



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Projekt Spallations-Neutronenquelle

**VERMESSUNG DER DYNAMISCHEN
EIGENSCHAFTEN EINES DREIACHSIGEN
KOORDINATENMESSTISCHES**

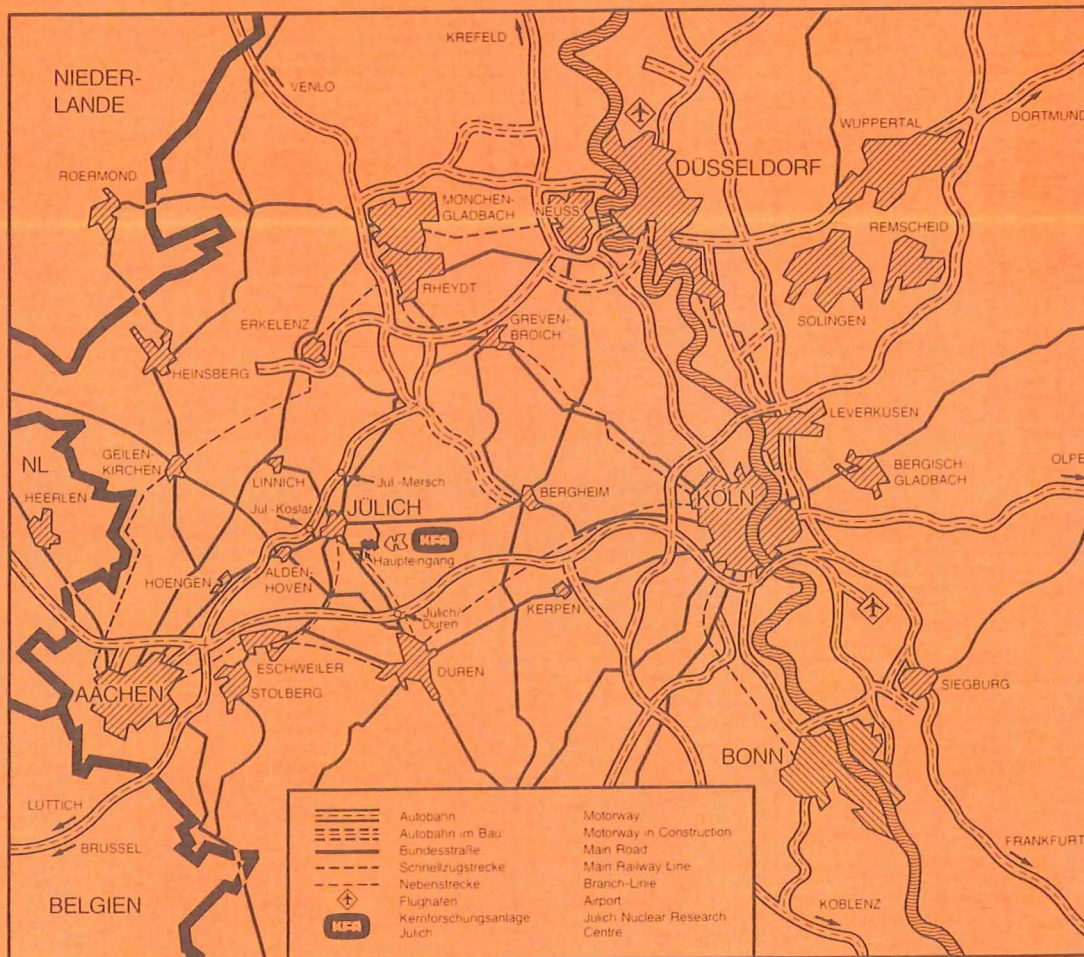
von

R. Schetzke, A. Hardt

Jül-Spez-318

Juni 1985

ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 318
 Projekt Spallations-Neutronenquelle Jül-Spez-318

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
 Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

VERMESSUNG DER DYNAMISCHEN EIGENSCHAFTEN EINES DREIACHSIGEN KOORDINATENMESSTISCHES

von

R. Schetzke, A. Hardt

Inhaltsverzeichnis

Abschnitt	Thema	Seite
1.	Einleitung	2
2.	Problemstellung	4
3.	Glasmaßstab	8
4.	Positioniercontroller	10
5.	Geschwindigkeitsmeßsystem	13
5.1.	Laserkopf	13
5.2.	Anzeigegerät	14
5.3.	Interferometer	16
6.	Lineare Geschwindigkeitskonstanz	17
7.	Geschwindigkeitsschankung der X-Achse bei konstanter Ausgangsspannung	32
8.	Allgemeines über Schwingungen	35
9.	Beschleunigungsaufnehmer	40
10.	Spektrumsanalysator	44
11.	Messungen an dem 3-d-Koordinaten- Messtisch an der X-Achse	50
11.1	Aufnehmerempfindlichkeit in Z-Richtung	50
11.2	Aufnehmerempfindlichkeit in Y-Richtung	62
11.3.	Aufnehmerempfindlichkeit in X-Richtung	69
12.	Schwingungsmessungen an der Y-Achse	74
12.1	Aufnehmerempfindlichkeit in Z-Richtung	74
12.2	Aufnehmerempfindlichkeit in Y-Richtung	81
13.	Schwingungsmessungen an der Z-Achse	84
13.1.	Aufnehmerempfindlichkeit in Z-Richtung	84
13.2.	Aufnehmerempfindlichkeit in Y-Richtung	87
14.	Schwingverhalten des Granitblocks in- folge Anfahren der Achsen X und Y	89
14.1	Schwingverhalten an dem Granit- block in X-Richtung	92
14.2.	Schwingungsmessungen an dem Granitblock in Y-Richtung	101
15.	Schlußbemerkung	104
16.	Literaturverzeichnis	106

1. Einleitung

Die Kernforschungsanlage Jülich und das Kernforschungszentrum Karlsruhe haben die Absicht, eine Spallationsneutronenquelle zu bauen, deren Bau in Jülich vorbereitet wird. Sie soll als flußstärkste Quelle von Neutronen, Protonen, Pionen, Myonen und Neutrinos für Zwecke der Physik und Chemie der kondensierten Materie, der Molekularbiologie, der Mittelenergiephysik, der Radiochemie, der Strahlentherapie und der Materialforschung dienen.

Im Gegensatz zur Kernspaltung, wo spaltbare Atome durch Neutroneneinfang instabil werden und beim Zerfall wieder mehrere Neutronen freigeben, wird bei der Spallation mit hochenergiereichen Teilchen auf ein Target geschossen, wobei die Atome des Targetmaterials (Blei oder angereichertes Uran) die oben genannten Teilchen abdampfen. Dazu werden Protonen als primäre Teilchen auf einer Beschleunigungsstrecke auf die notwendige Energie gebracht.

Das Konzept der Spallationsneutronenquelle richtet sich hauptsächlich nach den Erfordernissen der Nutzung von Neutronen.

Ein großer Vorteil einer Spallationsquelle ist, daß über die Beschleunigung der Primärteilchen der Quelle eine Zeitstruktur aufgeprägt werden kann. Es wird ein thermischer Neutronenfluß von $1,4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im zeitlichen Mittel und $7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im Puls angestrebt, dies erfordert einen Protonenstrahl von 5,0 MW Strahlleistung im zeitlichen Mittel /10/.

Die Bewegung der primären Teilchen im Beschleuniger gliedert sich in longitudinaler Richtung in der beschleunigt wird und in transversaler Richtung (=senkrecht zur Beschleunigungs-Richtung) auf. In transversaler-Richtung müssen die Teilchen fokussiert werden, weil sie sich wegen ihrer Ladung abstoßen (Raumladungseffekte). Außerdem kommen die Teilchen nicht parallel aus der Ionenquelle (Emittanz).

Eine weitere Defokussierung geschieht in den Beschleunigungsspalten der Driftröhren, deren axiales Feld zeitlich ansteigt. Dies bedingt wegen der Krümmung der Feldlinien eine radiale Ablenkung (HF-Defokussierung)/3/.

2. Problemstellung

Für den Beschleuniger werden fokussierende und strahlleitende Elemente benötigt, die entsprechend den Anforderungen aus der Theorie der Ionenoptik ausgelegt werden. Insbesondere werden hierfür Quadrupolmagnete eingesetzt, deren Eigenschaft es ist, in bestimmter Richtung zu fokussieren und senkrecht dazu defokussierend zu wirken. Durch Hintereinanderstellen mehrerer Quadrupole ist eine gesamte Fokussierung ähnlich wie in der Optik möglich.

In der Mitte der Magnete, durch die der Strahl gelenkt wird, ist die Stärke des Magnetfeldes gleich Null, während es nach außen linear ansteigt. Wegen der hohen Strahlleistung müssen die Magnete mit hoher Genauigkeit hinsichtlich ionenoptischer Eigenschaften sowie der mechanischen Justierung der optischen Achse gefertigt und eingebaut werden, um die Strahlverluste zu minimieren.

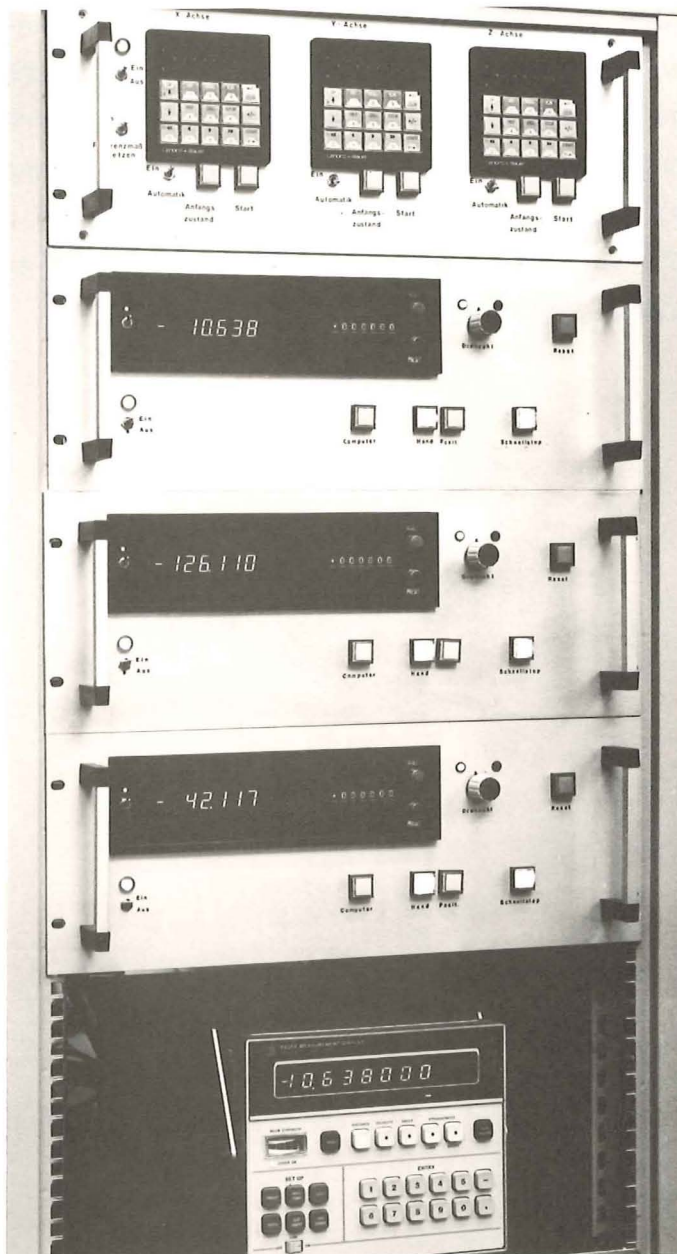
Um die Parameter der Magnetfelder sowie die Lage der optischen Achse zu den mechanischen Justiermarken mit hoher Präzision zu vermessen, wurde ein dreiachsiger Koordinatenmeßtisch (Bild 2) aufgebaut, der reproduzierbar Positionen in den Magnetfeldern anfahren kann.

Die Anzahl der Messungen wird zwischen 20 und 200.000 Punkte pro Magnet betragen, deren Feld unter Ausnutzung des Halleffekts mit einer sogenannten Hallsonde gemessen wird.

Zur Reduzierung der Meßzeit soll während des Durchlaufens der Sonde das Magnetfeld gemessen werden.

Um das mit höchster Genauigkeit durchführen zu können, müssen die statischen und dynamischen Parameter des dreidimensionalen Koordinatenmeßtisches bekannt sein.

Ziel dieser Arbeit ist es, das Verhalten des Tisches in bezug auf die Schwingungserregung der Spindel und der Lager in bezug auf Resonanzfrequenzen zu untersuchen. Das Anfahrverhalten des Schlittens, dessen Beschleunigung und Verzögerung den Tisch zum Schwingen anregt, zu vermessen und so die Fahrprozedur hinsichtlich Geschwindigkeit und Positioniergenauigkeit zu optimieren. Außerdem sollen die Toleranzen der Geschwindigkeit untersucht werden, um sicherzugehen, daß die Toleranzen der Geschwindigkeitskonstanz gewährleistet werden.



Positioniercontroller

Steuerungsgeräte mit Zähler

Anzeigegerät mit Laser
Measurement-Systems

Bild 1

Schaltschrank mit Steuerung und Laser-Anzeigegerät

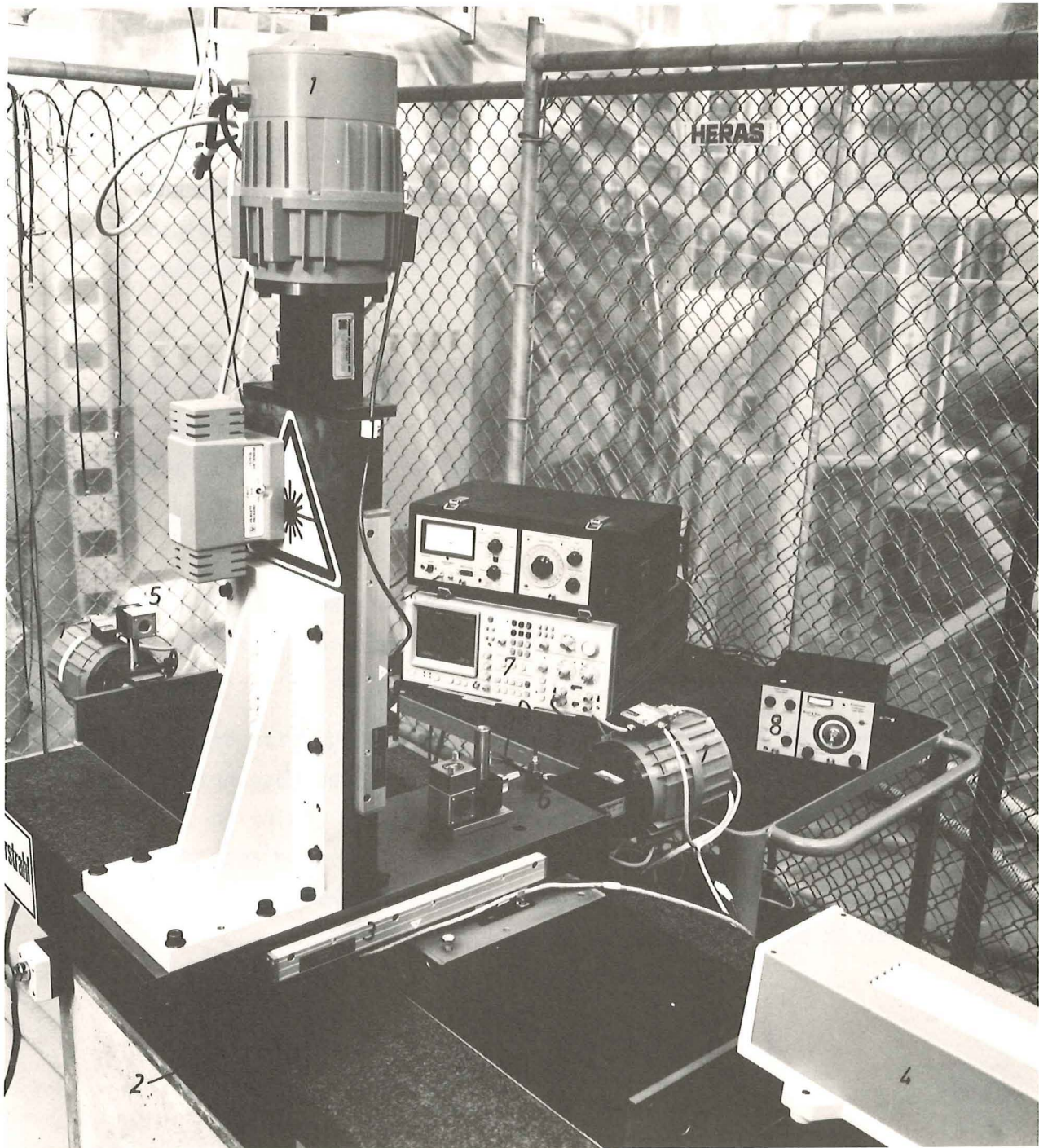


Bild 2 Dreiachsiger Koordinatenmeßtisch

- 1 = Die Achsen X, Y, Z mit den Gleichstrommotoren
- 2 = Granitblock
- 3 = Glasmaßstab
- 4 = Laserkopf
- 5 = Optische Geräte
- 6 = Beschleunigungsaufnehmer
- 7 = Frequenzanalysator
- 8 = Accelerometer Calibrator

Der Tisch hat drei Gleichstrommotoren, die jeweils senkrecht zueinander angeordnet sind. Zu jeder Achse gehört eine Regelschaltung, die wahlweise von Hand mit einem Potentiometer, mit einem Positioniercontroller (Bild 1) oder mit einem Computer gesteuert werden kann.

Ein Transformator liefert für den Motor $\pm 46 \text{ V}$ bis 8 A , die über den Regler dem Motor zugeführt werden und $\pm 15 \text{ V}$ Spannungsversorgung für den Regler selbst. Der Regler wird durch einen Tachogenerator mit dem Istwert versorgt (Vergl. /11/).

3. Glasmaßstab

Es wird pro Achse eine elektronisch auswertbare Wegmesseinrichtung zum Anfahren von Positionen benötigt. Der gemessene Verfahrweg wird von der Steuerung (Positioniercontroller (Bild 1) oder Computer) mit dem Sollwert verglichen. Bewegt sich der Maschinenschlitten, so werden die optisch erfaßten Wegschritte (Inkremente) je nach Bewegungsrichtung von einem Zähler in der Steuerung addiert oder subtrahiert. Um das Vorzeichen des Zählers (Bild 3 zu bestimmen, ist auf dem Lichtschrankenmaßstab ein zusätzlich um 90° verschobenes Inkrement angebracht.

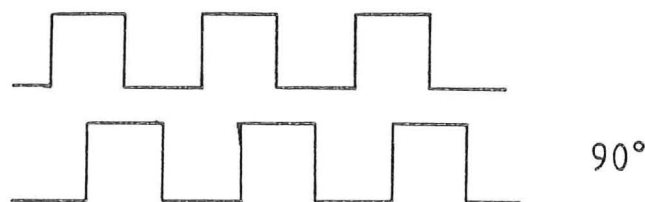


Bild 3 Impulsanordnung des Glasmaßstabes

Je nachdem welche Flanke zuerst beim Zähler erscheint, wird das Vorzeichen entsprechend gesetzt.

Ferner ist noch ein Referenzpunkt auf dem Glasmaßstab angebracht, um den Nullpunkt der Achse zu definieren, der sich hier in der Mitte befindet. Der Glasmaßstab hat eine mit Chrom aufgedampfte Gitterkonstante von $20 \mu\text{m} \approx 20 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Die maximale Geschwindigkeit des Schlittens beträgt:

$$v_{\text{max}} = 17.200 \text{ mm/min} \approx 0,286\bar{6} \text{ m/s. (Tab 3 c)}$$

Die maximale Frequenz, die der Lichtmaßstab abgibt ist:

$$f_{\text{max}} = \frac{v_{\text{max}}}{a} = \frac{0,286\bar{6}}{20 \cdot 10^{-6} \text{ s}} = 14333 \frac{1}{\text{s}} \quad (3.1)$$

$$f_{\text{max}} = 14,3 \text{ kHz}$$

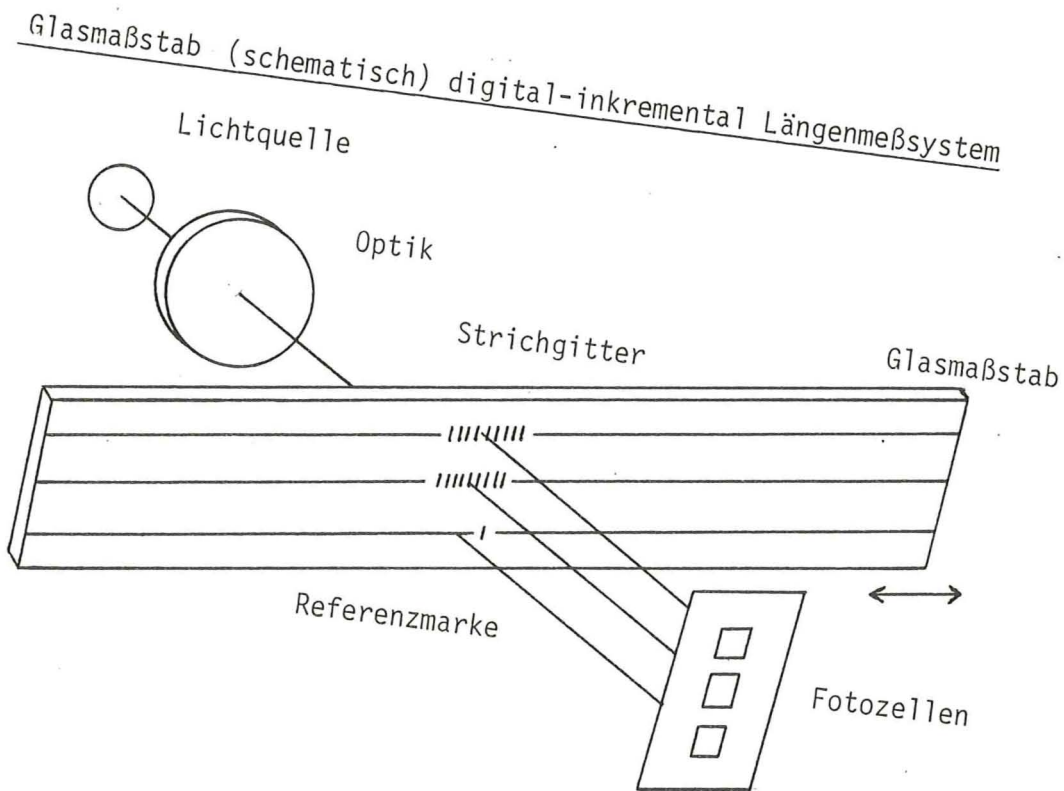


Bild 4

schematische Funktionsweise des Glasmaßstabes

4. Positioniercontroller

Wie schon erwähnt, wurde zur genauen Positionierung der Achsen ein Steuergerät (Controller) gebraucht, der programmierbare Positionen genau, durch Ist- und Sollwertvergleich, anfahren kann.

Ein vielseitiges und nahezu für jeden Anwendungsfall benutzbares Gerät bietet der Positioniercontroller GEL 4400 von Lenord + Bauer. (Bild 1)

Anwendung findet der Positioniercontroller besonders bei spanabhebenden Metallbearbeitungsmaschinen (Fräs- Bohr-, Schleifmaschinen), Biegemaschinen und Pressen, Kunststoffverarbeitungsmaschinen, Holzbearbeitungsmaschinen und Präzisionsmaschinen für jeweils eine Achse.

Das Konzept der Hardware besteht aus steckbaren Modulen. Auf einem Modul befinden sich ein Microcomputer mit seinem Micro-Prozessor, ein EPROM, in dem der Programmablauf gespeichert vorliegt und zur Funktionsänderung auswechselbar ist, sowie ein EAROM, das netzausfallsicher Daten speichert. Neben dem Netzteilmodul ist noch ein Zähler und Analogausgangsmodul eingebaut /3/.

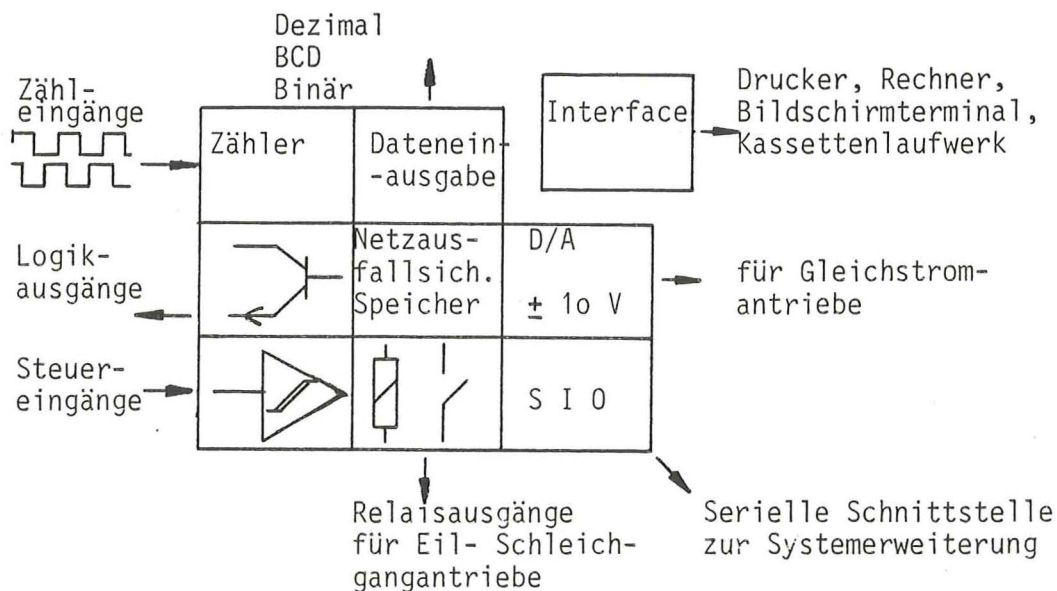


Bild 5

Blockschaltbild des Positioniercontrollers

Für die Programmierung des Positioniercontrollers stehen Speicherplätze für Sollwert, Positionen, Stückzahlen, dazu noch Speicherplätze für Maschinenkonstanten, Verrechnungswerte, Rampen, Kurven und Vorabschaltwerte zur Verfügung.

Die Programmierung findet im Dialogverkehr statt und wird über die Tastatur eingegeben.

Die Programmiermöglichkeit durch Tastatur ist zur Eingabe von Stückzahlen, Startadressen, Korrekturwerten, Brems-Beschleunigungsrampen und Multiplikatoren zur Verrechnung der Zähleingänge vorgesehen. Zusätzlich kann im Handbetrieb vor- oder rückwärts; schnell oder langsam durch Tipptasten gefahren werden.

Der Automatikbetrieb zur Abarbeitung der eingegebenen Sätze ist nur mit einem externen "Start"-Signal in Betrieb zu setzen. Der Automatikbetrieb kann durch ein externes Signal "Anfangszustand" unterbrochen und gleichzeitig der Anfangszustand der abzuarbeitenden Sätze hergestellt werden.

Zur Eingabe von Sätzen stehen 100 Positionen (Längen) oder 50 Sätze (Positionen- und Stückzahlangaben) zur Verfügung, wobei die Sollwerte als Positionen oder als Längenmaße (Kettenmaße) verarbeitet werden können, ohne das kleine Fehler bei den Kettenmaßen aufaddiert werden.

Es steht ein Analogausgang, der kurzschlußfest ist, von ± 10 V maximal mit 2,5 mV Auflösung zur Steuerung von Gleichstrommotoren zur Verfügung. Es kann die Beschleunigungsrampe, die zeitunabhängig von 100 ms bis 10 s lang sein kann, die Größe des Analogausganges und die Bremskurve programmiert werden /1/.

Eine große Bedeutung hat noch die Dateneingabe und -ausgabe zur Kommunikation mit einem Datenspeicher und anderen externen Geräten.

Die Eingänge des Positioniercontrollers sind auf 24 V festgelegt. Die vom Glasmaßstab kommenden Signale haben jedoch nur 12 V Impulshöhe. Deshalb wurden die 3 Zähleingänge (je Achse) mit zusätzlichen Widerständen modifiziert und auf 12 V angepaßt (Bild 6).

Der Positioniercontroller wird mit 220 V $\pm 10/-15\%$ versorgt, und die maximale Zählfrequenz beträgt 20 KHz. Mit den programmierbaren Steuerworten kann man durch Zusammenstellung verschiedener Zahlenkombinationen selbst die maschinenspezifischen Funktionen mosaikartig zusammenstellen, das macht die Bedienung des Positioniercontrollers besonders einfach /1/.

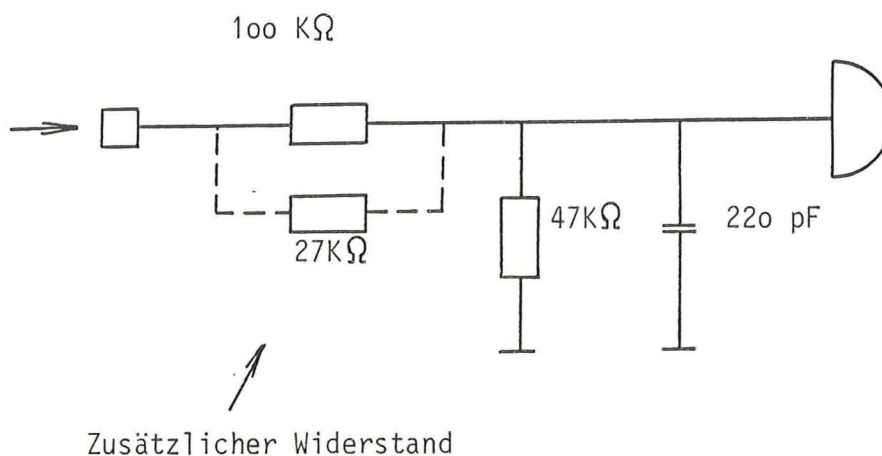


Bild 6 Eingangsschaltung für Logiksignale und Zählimpulse

5. Geschwindigkeitsmeßsystem

5.1. Laserkopf

Zur Erzeugung monochomatischen Lichts großer Kohärenzlänge wurde ein Helium- Neon Gaslaser benutzt. Es lassen sich noch außer Geschwindigkeitsmessungen, Streckenmessungen, Winkelmessungen, Ebenheitsmessungen, Richtwinkligkeitsmessungen und Parallelitätsmessungen durchführen. Dazu sind ein Anzeigegerät, der Laserkopf, ein Stativ und entsprechende optische Zubehöerteile notwendig.

Beim He-Ne Laser erzeugt man mittels einer Spannung von einigen KV in einer Entladungsröhre eine Gasentladung in einem Gasgemisch von He und Ne im Verhältnis 5 : 1. Durch Elektronenstoß werden metastabile He-Niveaus angeregt, die ihre Energie durch Stöße an Ne-Atome weitergeben. Durch die Anregung der Ne-Atome entstehen insbesondere folgende Linien:

$3 S_2 - 2 P_4$ 632,8 nm (rotes Licht)

$3 S_2 - 3 P_4$ 3390,0 nm

$2 S_2 - 2 P_4$ 1150,0 nm

Davon dominiert das rote Licht, die anderen Wellenlängen werden zum größten Teil in der Röhre schon absorbiert. Zwischen einem reflektierenden und einem halbreflektierenden Spiegel können sich stehende Wellen ausbreiten. Für den Schwingungsvorgang muß die Länge des Resonators ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge haben /8/.

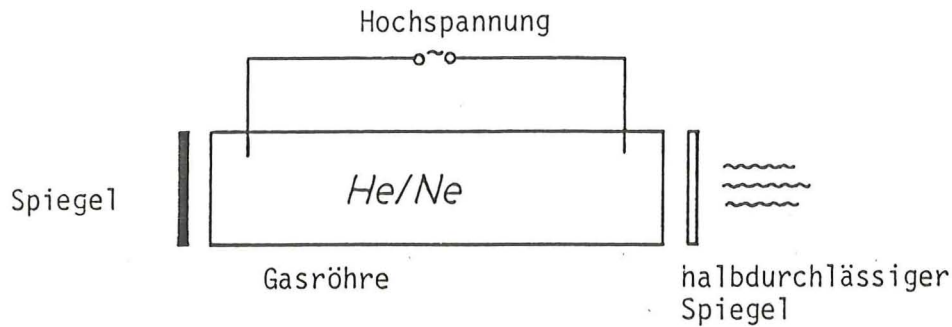


Bild 7 Laser schematisch

$$f = 4,737 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$
$$\lambda = 632,991 \text{ nm}$$

Durch Zeeman - Aufteilung entstehen daraus zwei Lasersignale, deren Frequenzen sich um 1,5 - 2 MHz unterscheiden und durch Polarisationsfilter senkrecht zueinander polarisiert werden.

Ein Teil der Strahlen wird über Strahlteiler abgezweigt und dient als Bezugsgröße für die Regelung der Laserfrequenz und für die Berechnung der abweichenden Anzahl der Wellenlängen.

5.2. Anzeigegerät

Das Anzeigegerät versorgt den Laserkopf mit der notwendigen Energie und rechnet die vom Laserkopf gelieferten Meßinformationen von Einheiten der Wellenlänge in Millimeter um.

Die maximale Geschwindigkeit beträgt $\pm 18000 \text{ mm/min} \pm 0,1\%$ und der Auflösung von $0,1 \text{ mm/min}$

Die optischen Geräte für Geschwindigkeitsmessungen sind ein Interferometer und zwei Parallelreflektoren.

Das Anzeigegerät berücksichtigt die Lichtgeschwindigkeitskompensation und korrigiert den Unterschied zwischen Lichtgeschwindigkeit in Luft und im Vakuum.

Die Wellenlänge von Licht hängt von ihrer Geschwindigkeit und diese wiederum von der Temperatur, dem Druck und in geringem Maße von der relativen Feuchte der Luft ab.

Der Kompensationsfaktor zur Korrektur ist definiert durch:

$$C_F = \frac{\lambda_L}{\lambda_V} \quad (5.1)$$

C_F = Kompensationsfaktor

λ_V = Lichtwellenlänge im Vakuum

λ_L = Lichtwellenlänge in Luft

Für den Luftdruck wird der absolute Druck benötigt und nicht der barometerische, der sich annähernd um 2,5 Torr pro 30 m über dem Meeresspiegel verringert.

$$P_A = P_B - \frac{H}{30} \cdot 2,5 \quad (5.2)$$

P_A = absoluter Druck in Torr

P_B = barometerischer Druck in Torr

H = Höhe über dem Meeresspiegel in m

Die Berechnung des Kompensationsfaktors C_F

$$C_F = \frac{10^6}{N + 10^6} \quad (5.3)$$

$$N = 0,3836391 \cdot P \left[\frac{1 + 10^6 P(0,817 - 0,0133T)}{1 + 0,003661 \cdot T} \right] - 3,033 \cdot 10^3 H (e^{0,057627 \cdot T}) \quad (5.4)$$

P = absoluter Druck in Torr

T = Lufttemperatur in $^{\circ}\text{C}$

H = relative Luftfeuchte in %

Das Ausgangssignal des Luftparameterraufnehmers für den Luftdruck, die Lufttemperatur und die Luftfeuchte ist eine Analogspannung, die in einen Digitalwert umgewandelt wird/12/.

Es wurde für die relative Luftfeuchte 50 % gewählt.

5.3. Interferometer

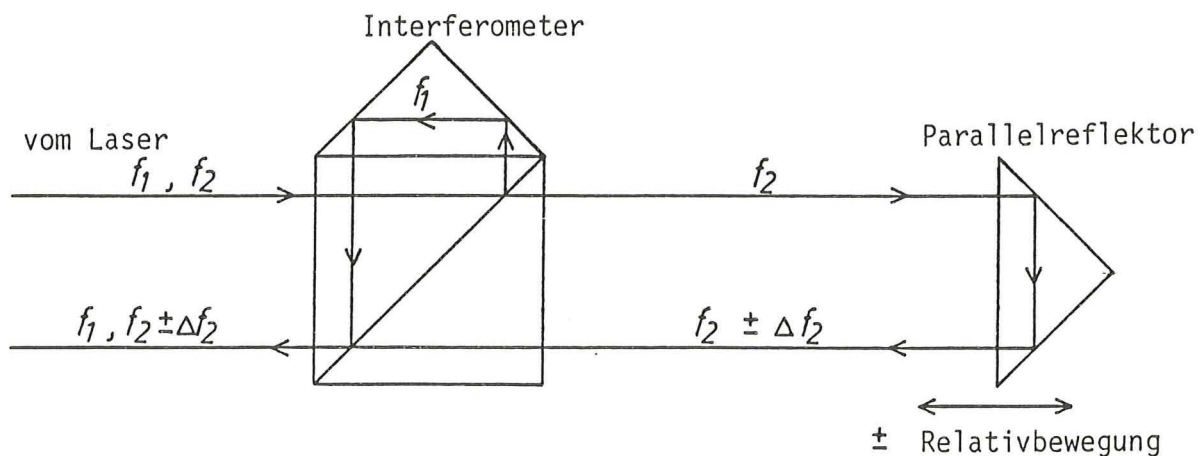


Bild 8 Interferometer und Parallelreflektor

Im Interferometer werden die Frequenzen f_1 und f_2 durch einen polarisierenden Strahlteiler aufgeteilt. Die Relativbewegung zwischen Interferometer und Parallelreflektor verursachen eine Dopplerverschiebung der Frequenz.

$$f_d = f_2 \frac{1 \pm \frac{v_q}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v_q^2}{c^2}}} \quad (5.5)$$

$$f_d = f_2 \pm \Delta f_2$$

f_d = Frequenz des Empfängers in $\frac{1}{s}$

f_2 = Frequenz des Senders in $\frac{1}{s}$

Δf_2 = Frequenzverschiebung

v_q = Geschwindigkeit des Empfängers m/s

c = Lichtgeschwindigkeit $3 \cdot 10^8$ m/s

$$f_d = f_2 \left(1 \pm \frac{v_q}{c}\right) \text{ für } v_q \ll c \quad (5.6)$$

Der Meß-Fotoempfänger erkennt daraus $f_1 - f_2 \pm \Delta f$ und vergleicht elektronisch mit der Bezugsmeßgröße $f_1 - f_2$, /9/ und daraus folgt dann Δf_2 und die Geschwindigkeit v_q .

$$v_q = \frac{\Delta f_2 \cdot c}{2 f_2} \quad (5.7)$$

6. Lineare Geschwindigkeitskonstanz

Als erstes wurde die Geschwindigkeitssteigung auf Linearität in Abhängigkeit von der Steuerspannung des Positioniercontrollers für alle drei Achsen des Tisches untersucht. Die Steuerspannung maximal 10 V, wurde in 10 Schritte unterteilt.

Die willkürliche Festlegung der Fahrtrichtung wird im Bild 9 verdeutlicht.

Die Ausgangsspannungen des Positioniercontrollers wurden gemessen mit einem digitalen Voltmeter.

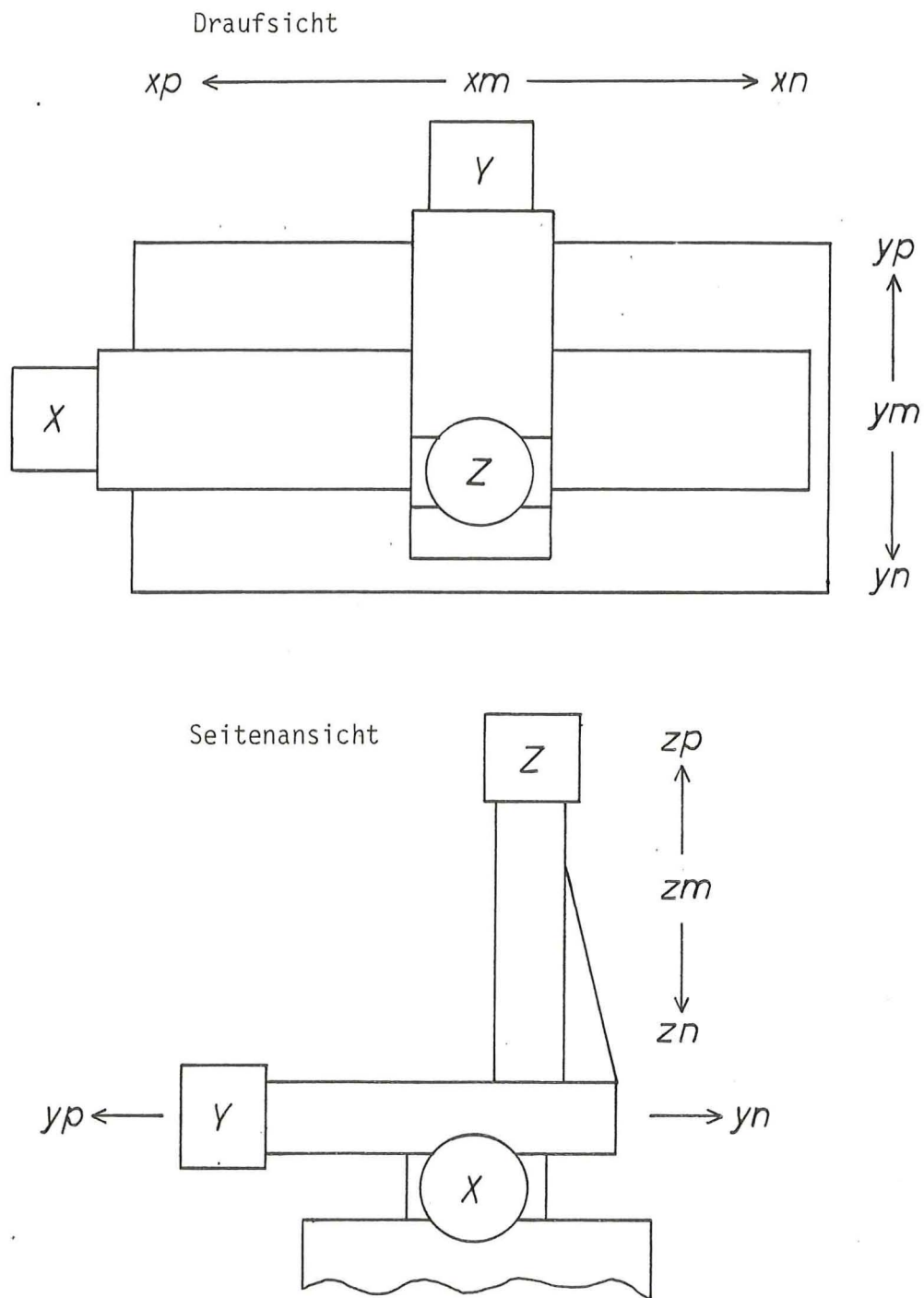


Bild 9 Festlegung der Fahrrichtung

Dabei bedeuten X, Y, Z die drei verschiedenen Achsen,

P (positiv) Fahrt in Richtung des Motors

N (negativ) Fahrt in entgegengesetzter Richtung des Motors

M (Mitte) Referenzpunkt des Lichtmaßstabes

In X-Richtung wurden folgende Werte ermittelt.

Tabelle 1 a zeigt die Geschwindigkeit der X-Achse in Abhängigkeit von der Ausgangsspannung des Positioniercontrollers.

Ausgangsspannung U_x	Geschwindigkeit v_{xm}	Fehler
1 V	1780 mm/min	± 2 mm/min
2 V	3548 mm/min	± 3 mm/min
3 V	5335 mm/min	± 5 mm/min
4 V	7098 mm/min	± 7 mm/min
5 V	8840 mm/min	± 8 mm/min
6 V	10653 mm/min	± 10 mm/min
7 V	12425 mm/min	± 12 mm/min
8 V	14143 mm/min	± 14 mm/min
9 V	15887 mm/min	± 15 mm/min
10 V	16450 mm/min	± 16 mm/min

Geschwindigkeitssteigung
der X-Achse

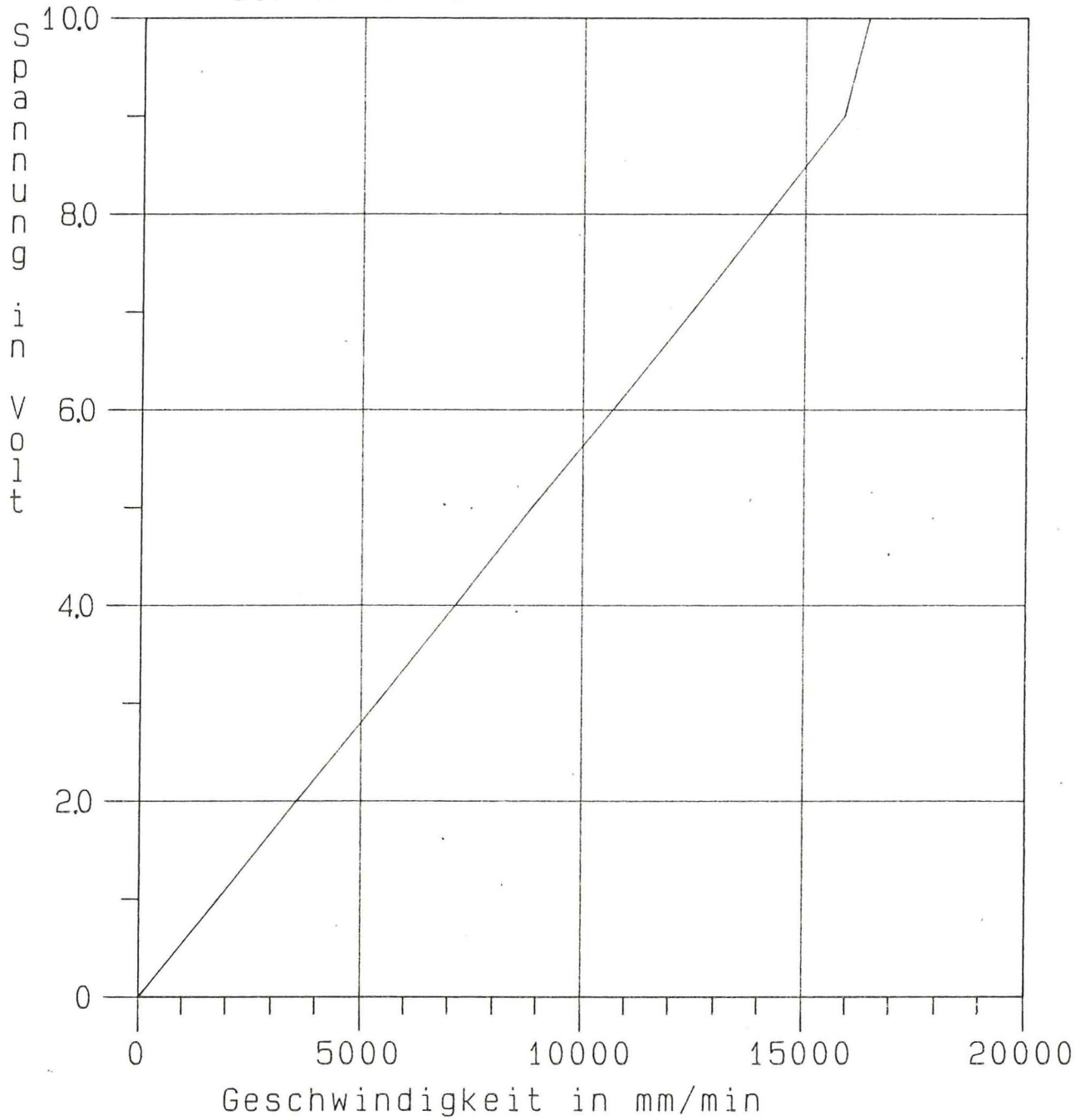


Bild 10

Die allgemeine Gleichung für Bild 10 lautet:

$$U_x = m_x \cdot v_x + b_x$$

U_x = Spannung in V

v_x = Geschwindigkeit in mm/min

m_x = Steigung in V min/mm

b_x = Konstante in V

Die Steigung wird berechnet nach der Anpassung der kleinsten Fehlerquadrate /12/

$$m_x = \frac{\sum_{k=1}^n v \sum_{k=1}^n U - n \sum_{k=1}^n v \sum_{k=1}^n U}{\left(\sum_{k=1}^n v \right)^2 - n \sum_{k=1}^n v^2} \quad (6.1)$$

$$b_x = \frac{\sum_{k=1}^n v \sum_{k=1}^n U - \frac{\left(\sum_{k=1}^n v \right) \left(\sum_{k=1}^n U \right)}{n}}{\left(\sum_{k=1}^n v \right)^2 - n \sum_{k=1}^n v^2} \quad (6.2)$$

v = Geschwindigkeit in mm/min

U = Ausgangsspannung in V

n = Anzahl der Messungen

Aus Tabelle 1 a ergeben sich für

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n v_{xm} &= 79709 \text{ mm/min} \\ \sum_{k=1}^n U_x &= 45 \text{ V} \\ \sum_{k=1}^n U_x \cdot v_{xm} &= 504493 \text{ V mm/min} \\ \sum_{k=1}^n v_{xm}^2 &= 8,93 \cdot 10^8 \text{ mm}^2/\text{min}^2 \end{aligned}$$

$n = 9$ weil der letzte Wert in Bild 10 nicht mehr linear ist,
wurde er nicht berücksichtigt, deshalb $n = 9$.

daraus folgt für:

$$m_x = 5,663 \cdot 10^{-4} \text{ V min/mm}$$

$$b_x = -0,0155 \text{ V}$$

Der wahrscheinlichste absolute Fehler ergibt sich zu

$$\epsilon = v_{xm} - v_x \quad (6.3)$$

ϵ = absoluter Fehler mm/min

v_{xm} = gemessene Werte aus Tabelle 1 a

v_x = gerechnete Werte aus Tabelle 1 b

und der relative Fehler ϵ_r in %

$$\epsilon_r = \frac{v_{xm} - v_x}{v_x} \cdot 100 \% \quad (6.4)$$

$$v_x = \frac{U_x - b_x}{m_x}$$

Tabelle 1 b berechnete Geschwindigkeiten und deren Abweichung von den gemessenen Werten

U_x	v_x	ϵ	ϵ_r
1 V	1793,2 mm/min	- 13,2 mm/min	- 0,73 %
2 V	3559,0 mm/min	- 11,0 mm/min	- 0,31 %
3 V	5325,0 mm/min	+ 10,0 mm/min	+ 0,19 %
4 V	7090,7 mm/min	+ 7,2 mm/min	+ 0,10 %
5 V	8856,6 mm/min	- 16,6 mm/min	- 0,19 %
6 V	10622,5 mm/min	+ 30,5 mm/min	+ 0,29 %
7 V	12388,3 mm/min	+ 36,7 mm/min	+ 0,30 %
8 V	14154,0 mm/min	- 11,0 mm/min	- 0,01 %
9 V	15920,0 mm/min	- 33,0 mm/min	- 0,21 %
10 V	17686,0 mm/min	-1236,0 mm/min	- 7,00 %

In Y-Richtung wurden folgende Werte ermittelt:

Tabelle 2 a zeigt die Geschwindigkeit der Y-Achse in Abhängigkeit von der Ausgangsspannung der Positionen

Ausgangsspannung U_y	Geschwindigkeit v_{ym}	Fehler
1 V	1760 mm/min	± 2 mm/min
2 V	3500 mm/min	± 3 mm/min
3 V	5270 mm/min	± 5 mm/min
4 V	6950 mm/min	± 6 mm/min
5 V	8630 mm/min	± 8 mm/min
6 V	10500 mm/min	± 10 mm/min
7 V	12100 mm/min	± 12 mm/min
8 V	13900 mm/min	± 14 mm/min
9 V	15480 mm/min	± 15 mm/min
10 V	17100 mm/min	± 17 mm/min

Geschwindigkeitssteigung
der Y-Achse

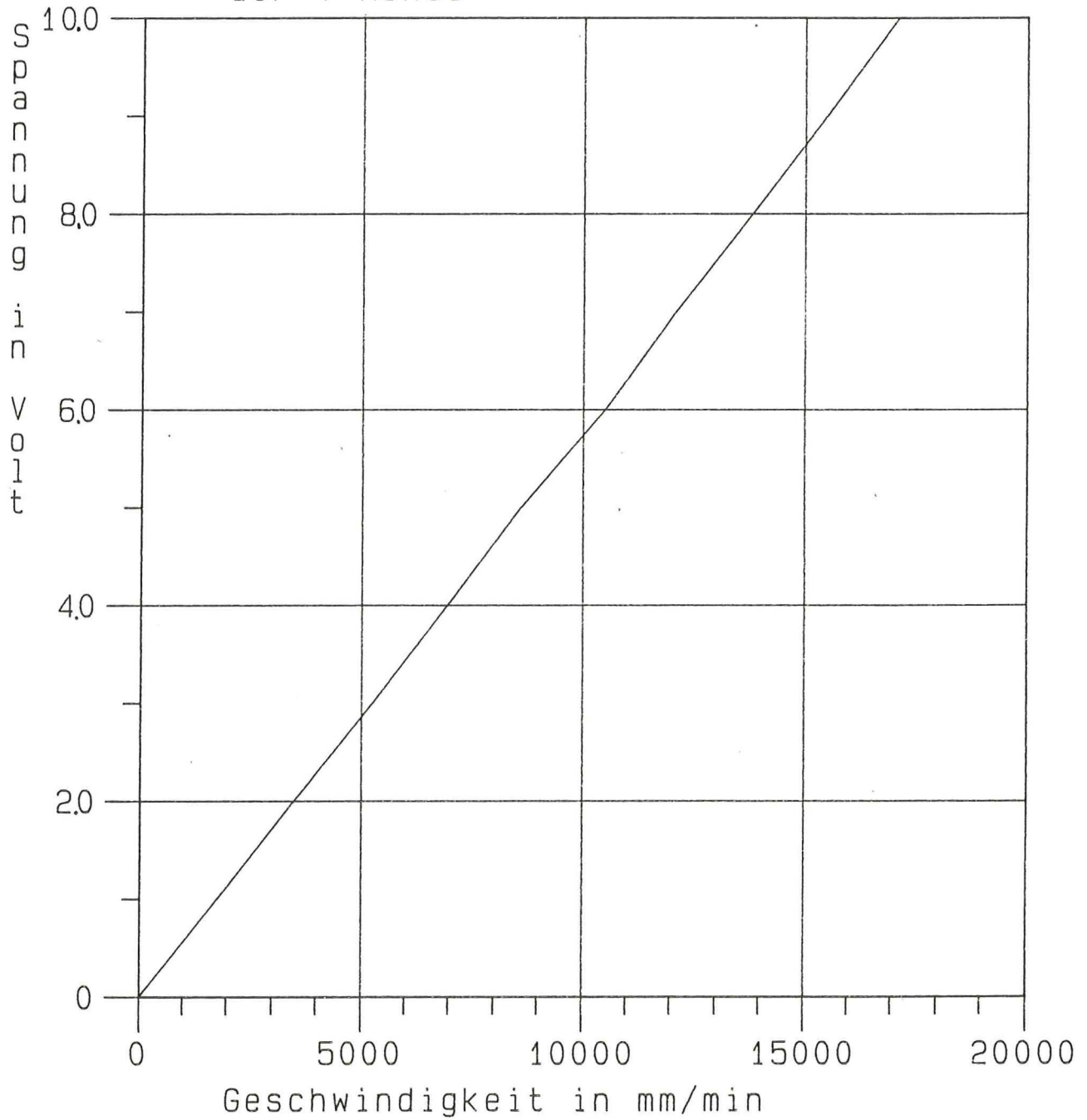


Bild 11

für Bild 11

$$U_y = m_y \cdot v_y + b_y$$

Nach Tabelle 2 a ergibt sich:

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n v_{ym} &= 95190 \text{ mm/min} \\ \sum_{i=1}^n U_y &= 55 \text{ V} \\ \sum_{i=1}^n v_{ym} U_y &= 664740 \text{ V mm/min} \\ \sum_{i=1}^n v_{ym}^2 &= 1,148 \cdot 10^9 \text{ mm}^2/\text{min}^2 \\ n &= 10\end{aligned}$$

n = Anzahl der Messungen

daraus folgt nach Gl. (6.1) und (6.2) für:

$$m_y = 5,842 \cdot 10^{-4} \text{ V min/mm}$$

$$b_y = - 0,0608 \text{ V}$$

Für die Y-Achse ergab sich

Tabelle 2 b berechnete Geschwindigkeiten und deren Abweichung von den gemessenen Werten.

U_y	v_y	ϵ	ϵ_p
1 V	1815,8 mm/min	- 55,8 mm/min	- 3,07 %
2 V	3527,0 mm/min	- 27,5 mm/min	- 0,78 %
3 V	5239,3 mm/min	+ 30,7 mm/min	+ 0,57 %
4 V	6951,0 mm/min	- 1,0 mm/min	- 0,01 %
5 V	8662,8 mm/min	- 32,8 mm/min	- 0,38 %
6 V	10374,5 mm/min	+ 125,5 mm/min	+ 1,22 %
7 V	12086,3 mm/min	+ 13,7 mm/min	+ 0,11 %
8 V	13798,0 mm/min	+ 102,0 mm/min	+ 0,74 %
9 V	15509,7 mm/min	- 29,7 mm/min	- 0,20 %
10 V	17221,5 mm/min	- 121,5 mm/min	- 0,70 %

Fehlerrechnung nach Gl. (6.3) und (6.4).

In Z-Richtung wurde in zwei Richtungen gemessen, weil die Z-Achse einmal mit und einmal gegen die Schwerkraft fahren muß. Die Werte für ZP und ZN siehe Tabelle 3 a.

Tabelle 3a zeigt Geschwindigkeiten der Z-Achse in Abhängigkeit von der Ausgangsspannung des Positioniercontrollers

Ausgangsspannung U_z	Geschwindigkeit		Fehler
	v_{zp}	v_{zn}	
1 V	1738 mm/min	1737 mm/min	± 3 mm/min
2 V	3460 mm/min	3490 mm/min	± 4 mm/min
3 V	5230 mm/min	5200 mm/min	± 5 mm/min
4 V	6940 mm/min	6950 mm/min	± 8 mm/min
5 V	8630 mm/min	8620 mm/min	± 10 mm/min
6 V	10400 mm/min	10380 mm/min	± 10 mm/min
7 V	12070 mm/min	12090 mm/min	± 12 mm/min
8 V	13780 mm/min	13810 mm/min	± 13 mm/min
9 V	15480 mm/min	15500 mm/min	± 15 mm/min
10 V	17200 mm/min	17200 mm/min	± 18 mm/min

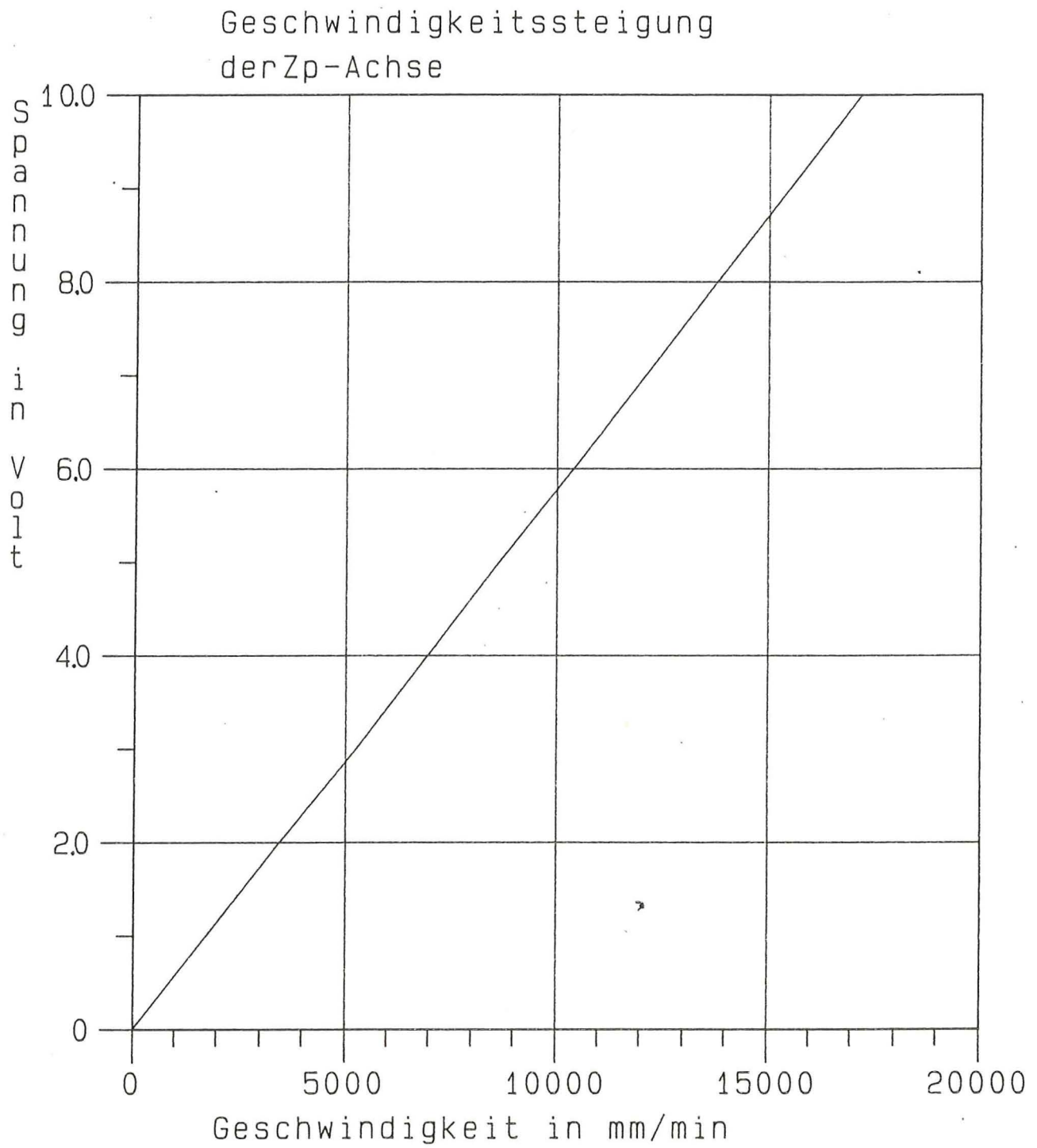


Bild 12

Geschwindigkeitssteigung
der Zn-Achse

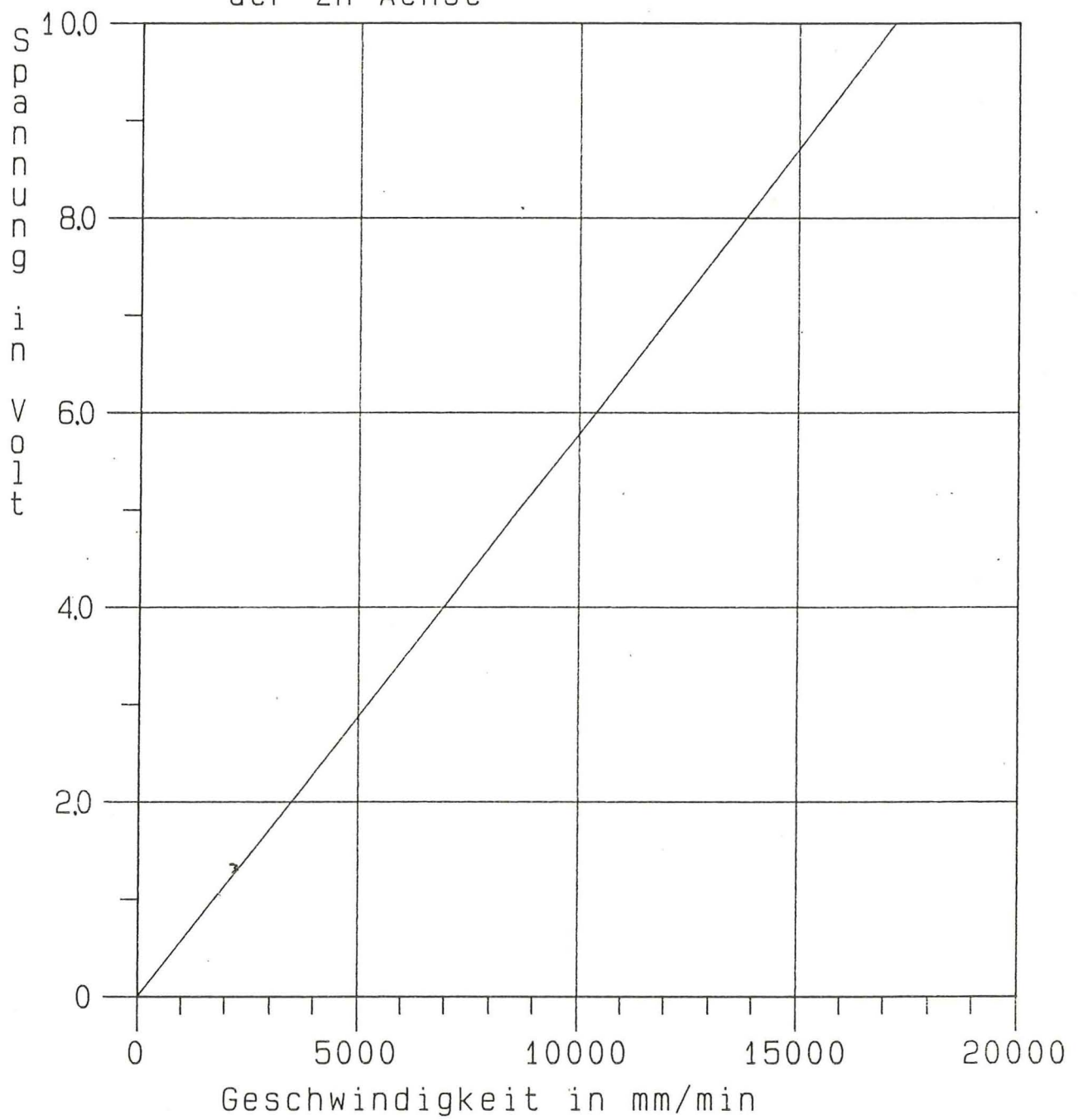


Bild 13

Für Bild 12

ergibt sich aus Tabelle 3 a

$$\sum_{k=1}^n U_{zp} = 55 \text{ V}$$

$$\sum_{k=1}^n v_{zp} = 94928 \text{ mm/min}$$

$$\sum_{k=1}^n U \cdot v_{zp} = 663698 \text{ V} \cdot \text{mm/min}$$

$$\sum_{k=1}^n v_{zp}^2 = 1,144 \cdot 10^9 \text{ mm}^2/\text{min}^2$$

$$n = 10 \text{ Anzahl der Messungen}$$

$$m_{zp} = 5,825 \cdot 10^{-4} \text{ V min/mm}$$

$$b_{zp} = - 0,03 \text{ V}$$

und für Bild 13

$$\sum_{k=1}^n U_{zn} = 55 \text{ V}$$

$$\sum_{k=1}^n v_{zn} = 94977 \text{ mm/min}$$

$$\sum_{k=1}^n U_{zn} \cdot v_{zn} = 664107 \text{ V} \cdot \text{mm/min}$$

$$\sum_{k=1}^n v_{zn}^2 = 1,1456 \cdot 10^9 \text{ mm}^2/\text{min}^2$$

$$n = 10 \text{ Anzahl der Messungen}$$

$$m_{zn} = 5,82 \cdot 10^{-4} \text{ V min/mm}$$

$$b_{zn} = - 0,0283 \text{ V}$$

m_{zp} , b_{zp} , m_{zn} , b_{zn} , aus Gl. (6.1) und (6.2)

Für die Z-Achse ergab sich:

Tabelle 3 b Berechnete Geschwindigkeiten in ZP-Richtung und deren Abweichung von den gemessenen Werten.

U_z	v_{zp}	ϵ	ϵ_r
1 V	1768,2 mm/min	- 30,2 mm/min	- 1,74 %
2 V	3485,0 mm/min	- 25,0 mm/min	- 0,72 %
3 V	5201,7 mm/min	+ 28,3 mm/min	+ 0,54 %
4 V	6918,5 mm/min	+ 21,5 mm/min	+ 0,31 %
5 V	8635,2 mm/min	- 5,2 mm/min	- 0,06 %
6 V	10352,0 mm/min	+ 48,0 mm/min	+ 0,46 %
7 V	12068,7 mm/min	+ 1,3 mm/min	+ 0,01 %
8 V	13785,4 mm/min	- 5,4 mm/min	- 0,04 %
9 V	15502,0 mm/min	- 22,0 mm/min	- 0,14 %
10 V	17219,0 mm/min	- 19,0 mm/min	- 0,11 %

Tabelle 3 c Berechnete Geschwindigkeiten in ZN-Richtung und deren Abweichung von den gemessenen Werten.

U_z	v_{zn}	ϵ	ϵ_r
1 V	1766,8 mm/min	- 29,8 mm/min	- 1,69 %
2 V	3485,0 mm/min	+ 5,0 mm/min	+ 0,14 %
3 V	5203,0 mm/min	+ 3,0 mm/min	+ 0,05 %
4 V	6921,5 mm/min	+ 28,5 mm/min	+ 0,41 %
5 V	8639,7 mm/min	- 19,7 mm/min	- 0,23 %
6 V	10358,0 mm/min	+ 21,1 mm/min	+ 0,21 %
7 V	12076,0 mm/min	+ 13,9 mm/min	+ 0,11 %
8 V	13794,0 mm/min	+ 15,7 mm/min	+ 0,11 %
9 V	15512,5 mm/min	- 12,5 mm/min	- 0,08 %
10 V	17230,0 mm/min	- 30,0 mm/min	- 0,18 %

Fehlerrechnung nach Gl. (6.3) und (6.4).

7. Geschwindigkeitsschwankung der X-Achse bei konstanter Ausgangsspannung

Bei konstanter Ausgangsspannung des Positioniercontrollers sollte die Geschwindigkeit des Schlittens der X-Achse auch möglichst konstant sein. Es ist abzusehen, daß die Fahrgeschwindigkeit mit unter 1 V Ausgangsspannung betrieben wird (Abschnitt 11). Es wurden Ausgangsspannungen von 0,4 V, 0,6 V und 0,8 V gewählt.

Der Nullpunkt des Weges wurde gewählt bei dem X-Schlitten in XP-Stellung (Bild 9).

Tabelle 4 zeigt die Geschwindigkeiten über den Weg der X-Achse bei konstanten Ausgangsspannungen.

Weg in mm	Spannung in V	0,4 V	0,6 V	0,8 V
50		720 mm/min	1074 mm/min	1442 mm/min
100		718 mm/min	1074 mm/min	1441 mm/min
200		721 mm/min	1072 mm/min	1443 mm/min
300		721 mm/min	1072 mm/min	1442 mm/min
400		720 mm/min	1073 mm/min	1442 mm/min
500		721 mm/min	1072 mm/min	1441 mm/min
600		722 mm/min	1074 mm/min	1441 mm/min
\bar{v}	=	720,4 mm/min	1073 mm/min	1441,7 mm/min

Die größte Schwankung in X-Richtung ergibt:

$$\epsilon_g = v_g - \bar{v} \quad (7.1)$$

$$\epsilon_{rg} = \frac{\epsilon_g}{\bar{v}} \quad 100 \% \quad (7.2)$$

$$\epsilon_k = v_k - \bar{v} \quad (7.3)$$

$$\epsilon_{rk} = \frac{\epsilon_k}{\bar{v}} \quad 100 \% \quad (7.4)$$

ϵ_g = größter absoluter Fehler

ϵ_k = kleinster absoluter Fehler

ϵ_{rg} = größter prozentualer Fehler

ϵ_{rk} = kleinster prozentualer Fehler

\bar{v} = arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeit in mm/min

v_g = größte Geschwindigkeit der Meßreihe in Tabelle 4

v_k = kleinste Geschwindigkeit der Meßreihe in Tabelle 4

bei 0,4 V ergibt sich:

$$\epsilon_g = 722 \text{ mm/min} - 720,4 \text{ mm/min} = 1,6 \text{ mm/min}$$

$$\epsilon_{rg} = 0,22 \%$$

$$\epsilon_k = 718 \text{ mm/min} - 720,4 \text{ mm/min} = - 2,4 \text{ mm/min}$$

$$\epsilon_{rk} = - 0,33 \%$$

bei 0,6 V ergibt sich:

$$\epsilon_g = 1074 \text{ mm/min} - 1073 \text{ mm/min} = 1 \text{ mm/min}$$

$$\epsilon_{rg} = 0,1 \%$$

$$\epsilon_k = 1072 \text{ mm/min} - 1073 \text{ mm/min} = - 1 \text{ mm/min}$$

$$\epsilon_{rk} = - 0,1 \%$$

bei 0,8 V ergibt sich:

$$\epsilon_g = 1443 \text{ mm/min} - 1441,7 \text{ mm/min} = 1,28 \text{ mm/min}$$

$$\epsilon_{rg} = 0,09 \%$$

$$\epsilon_k = 1441 \text{ mm/min} - 1441,7 \text{ mm/min} = - 0,7 \text{ mm/min}$$

$$\epsilon_{rk} = - 0,05 \%$$

Die Standardabweichung für 0,4 V

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n - 1}} \quad (7.5)$$

n = Anzahl der Messungen

$$\delta_r = \frac{\delta}{\bar{v}} \quad 100 \% \quad (7.6)$$

δ_r = relative Standardabweichung in %

daraus folgt:

$$\bar{\sigma} = \pm 1,27 \text{ mm/min}$$

$$\bar{\sigma}_r = \pm 0,18 \%$$

Standardabweichung für 0,6 V

nach Gl. (7.5)

$$\bar{\sigma} = \pm 1 \text{ mm/min}$$

$$\bar{\sigma}_r = \pm 0,093 \%$$

Standardabweichung für 0,8 V

nach Gl. (7.5)

$$\bar{\sigma} = \pm 0,75 \text{ mm/min}$$

$$\bar{\sigma}_r = \pm 0,05 \%$$

Einmal die Standardabweichung bedeutet, daß sich $P = 68,3 \%$ der Geschwindigkeiten innerhalb der angegebenen Toleranz von $+\bar{\sigma}_r$ und $-\bar{\sigma}_r$ befinden /5/.

8. Allgemeines über Schwingungen

Die Schwingungen an Werkzeugmaschinen haben je nach Größe einen schädlichen Einfluß auf die Lebensdauer der Maschinen. Schwingungen können als oszillierende Bewegung eines Körpers um eine Referenzlage aufgefaßt werden, dessen Energie, wenn keine Dämpfung vorhanden wäre, unabhängig von der Zeit ist. Es wird der eingeschwungene Fall betrachtet.

$$W = \frac{1}{2} c s_0^2 = \frac{1}{2} m \cdot v_0^2 = \frac{1}{2} m \cdot \omega_0^2 s_0^2 \quad (8.1)$$

$$W = W_{\text{pot}} = W_{\text{kin}}$$

s_0 = Maximale Auslenkung in m

c = Federkonstante (Steifigkeit) in N/m

m = Masse in kg

v_0 = maximale Geschwindigkeit in m/s

ω_0 = Eigenkreisfrequenz in $\frac{1}{s}$

Wenn die Eigenkreisfrequenz, die jedes Bauteil besitzt,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (8.2)$$

mit erzwungener Schwingung zusammenfällt, tritt Resonanz auf, wobei die Energieaufnahme am größten ist und Beschädigungen auftreten können.

Die Energiezufuhr von außen wird als Störglied in der Differentialgleichung aufgefaßt

$$F_0 \cdot \sin \omega t$$

$$F_0 = c \cdot x$$

Reale Schwingungen besitzen aber immer eine Dämpfungszahl.

Für eine Heteronome Schwingung sieht die Differentialgleichung folgendermaßen aus:

$$m \cdot \ddot{s} + Q \cdot \dot{s} + c \cdot s = c \cdot r \cdot \sin \omega t \quad (8.3)$$

x = Auslenkung des Erregers

F_0 = Kraft des Erregers in N

ω = Erregerfrequenz in $\frac{1}{s}$

\ddot{s} = Beschleunigung in m/s^2

\dot{s} = Geschwindigkeit in m/s

s = Auslenkung des Schwingers

$$s = s_0 \cdot \sin (\omega t - \delta) \quad (8.4)$$

δ = Phasenverschiebung zwischen Erreger und Schwinger

Die Geschwindigkeit \dot{s} ist die Ableitung des Weges nach der Zeit, also:

$$\dot{s} = \frac{ds}{dt} = s_0 \omega \cos (\omega t - \delta) \quad (8.5)$$

und die Beschleunigung \ddot{s} ist die Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit, also:

$$\ddot{s} = \frac{d\dot{s}}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2}$$

$$\ddot{s} = -s_0 \omega^2 \sin(\omega t - \delta) \quad (8.6)$$

Durch Einsetzen und Umformen ergibt sich:

$$s = \frac{c \cdot x \sin(\omega t - \delta)}{\sqrt{(c - m \cdot \omega^2)^2 + g^2 \omega^2}} \quad (8.7)$$

Resonanz tritt ein wenn die Auslenkung am größten wird, oder der Nenner von Gl. (8.7)

$$(c - m \cdot \omega^2)^2 + g^2 \omega^2$$

am kleinsten wird, also

$$\frac{d}{d\omega} = 0 = -2m \cdot c + 2m^2 \omega_r^2 + g^2$$

dann hat ω den Wert der Resonanzfrequenz ω_r
Umstellen nach der Resonanzfrequenz ω_r

$$\omega_r = \sqrt{\frac{c}{m} - \frac{g^2}{2m^2}} = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{g^2}{2m^2}} \quad (8.8)$$

Einsetzen von ω_r für ω in Gl. (8.7) und Umstellen der Gleichung ergibt die Resonanzamplitude.

$$s_{or} = \frac{c \cdot x}{g \sqrt{\omega_0^2 - \frac{g^2}{4m^2}}} \quad (8.9)$$

s_{or} = Resonanzamplitude

mit dem dimensionslosen Dämpfungsgrad

$$g_0 = \frac{g}{2m \cdot \omega_0} \quad (8.10)$$

g_0 = Dämpfungsgrad

wird

$$s_{or} = \frac{x}{2 \cdot g_0 \sqrt{1 - g_0^2}}$$

Die Resonanzfrequenz ist von der Dämpfungszahl abhängig, es tritt keine Resonanz mehr auf bei:

$$\omega_r = 0 = \frac{c}{m} - \frac{g^2}{2m^2}$$

$$\omega_r = 0 \text{ wenn } g = \sqrt{2 \cdot c \cdot m}$$

und

$$g_0 = \frac{\sqrt{2 \cdot c \cdot m}}{2 m \omega_0} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Die Phasenverschiebung δ errechnet sich zu:

$$\tan \delta = \frac{g \cdot \omega}{c - m \cdot \omega^2} = \frac{2 \cdot g_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (8.11)$$

Resonanz tritt auf bei $\frac{\omega}{\omega_0} = 1$

dann ist

$\tan \delta = +\infty$ und das ist der Fall bei $\delta = 90^\circ$

Umstellen der Amplitudengleichung Gl. (8.7) mit dem Dämpfungsgrad Gl. (8.10) und der Eigenkreisfrequenz Gl. (8.2), ergibt:

$$s_0 = \frac{x}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4 g_0^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad /6/ \quad (8.12)$$

9. Beschleunigungsaufnehmer

Eine Beschleunigung lässt sich gut mit piezoelektrischen Gebern messen. Verformt man bestimmte Arten von Einkristallen elastisch, durch Aufbringen einer Kraft F , dann treten an bestimmten Flächen der Kristalle elektrische Ladungen Q auf. Die auftretenden Ladungen hängen ausschließlich von der Deformation des Kristalles ab und benötigen keine Hilfsspannungsquelle, deswegen sind es aktive Elemente.

Die Elementarzelle z.B. von Quarz besteht aus 3 Si und 3 O_2 Atome und bilden idealisiert die Form eines 6-Eckes.

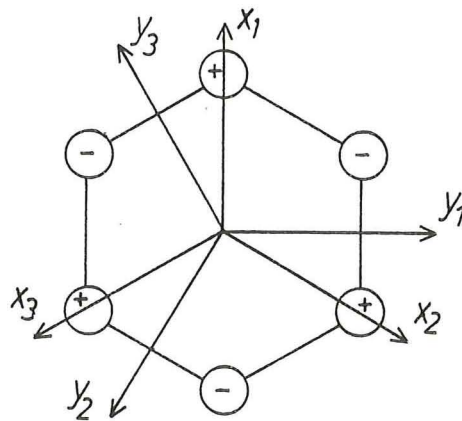


Bild 14 Ideale Form von Quarz mit seinen Achsen

- ⊕ Si- Ionen sind 4-fach positiv geladen
- ⊖ $2 O_2$ - Ionen sind je 2-fach negativ geladen

Infolge der Symetrie kompensieren sich die Ladungen der einzelnen Atome.

Drückt man nun in X_1 -Richtung wird der Kristall deformiert und es treten Ladungen hervor (Bild 15).

Qualitative Erläuterungen des direkten piezoelektrischen Effektes von Quarz

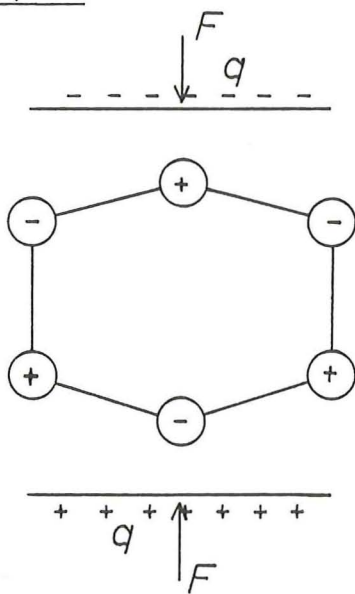


Bild 15 a Druck von oben

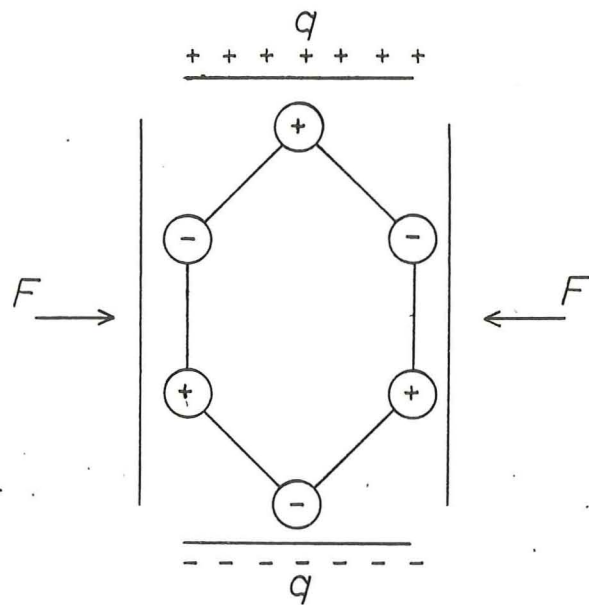


Bild 15 b Druck von der Seite

Deformiert man in X_1 -Richtung oder in Y_1 -Richtung treten immer an den selben Flächen die Ladungen auf, nur mit umgekehrten Vorzeichen. Ein hoher Innenwiderstand ist nötig, um ein schnelles Abfließen der Ladung zu verhindern /9/.

Das Auftreten der Ladung berechnet sich zu

$$q = P \cdot A_q \quad (9.1)$$

$$P = d \cdot \sigma \quad (9.2)$$

P = Vektor-Komponente in C/m^2

d = piezoelektrisches Werkstoffmodul in C/N

σ = Spannung auf eine Fläche A_F des Kristalls in N/m^2

A_q = Fläche an der Ladung auftritt in m^2

Eine Spannung ergibt sich zu

$$U_a = \frac{q}{C_a}$$

C_a = Innere Kapazität des Aufnehmers

$$C_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \frac{Aq}{r} \quad (9.3)$$

ϵ_r = Dielektrizitätszahl

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As V}^{-1} \text{ m}^{-1}$ - elektrische Feldkonstante

A_q = Flächengröße an der Ladung auftritt

r = Abstand der Flächen A_q des Kristalls voneinander

In einer Meßkette sind zusätzlich noch beträchtliche Kapazitäten vorhanden.

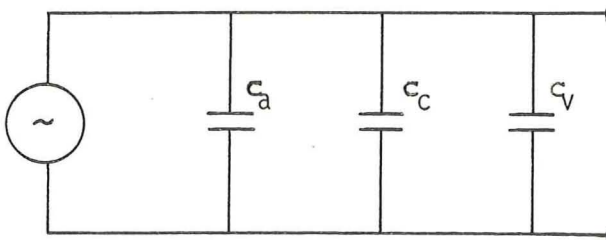


Bild 16 Kapazitäten der Meßkette

Damit sinkt die Spannung ab, auf

$$U = \frac{q}{C_a + C_c + C_v} \quad (9.4)$$

C_a = Aufnehmer Kapazität

C_c = Kabel Kapazität

C_v = Verstärkereingangskapazität

Die Kraft auf den Kristall ergibt sich zu:

$$F = m \cdot a \quad (9.5)$$

F = Kraft auf Kristallfläche in N

m = Masse des Beschleunigungsaufnehmers in kg

a = Beschleunigung in m/s^2

$$\vartheta = \frac{F}{A_F} \quad (9.6)$$

A_F = Fläche des Kristalls an der die Kraft F angreift in m^2

Die Kombination der Gleichungen (9.1), (9.2), (9.4), (9.5) (9.6) ergibt eine Abhängigkeit des Ausgangssignals von der Beschleunigung.

$$a = U \frac{c_a + c_c + c_v}{d \cdot m} \cdot \frac{A_F}{A_q} \quad (9.7)$$

Der Vorteil von polarisierten ferroelektrischen Keramiken ist die gute Kontrolle der piezoelektrischen Eigenschaften während des Herstellungsprozesses.

Das Keramikelement wird nach dem Sintern mit Elektroden bestückt und durch eine hohe Spannung polarisiert. Die piezoelektrischen Achsen werden dadurch permanent festgelegt /9/.

Benutzt wurde ein Aufnehmer, der aus Bleititanat-Zirkonat besteht.

$$\begin{aligned} E &= 7 \text{ pC/ms}^{-2} && \text{Empfindlichkeit} \\ d_{33} &= 270 \text{ pC/N} && \text{Modul} \\ \epsilon_r &= 1500 && \text{Dielektrizitätszahl} \end{aligned}$$

Wegen der einfachen Handhabung wurde als Befestigungsmethode ein Magnet gewählt. Dadurch fällt die Resonanzfrequenz f_r des Aufnehmers auf ungefähr 9 KHz ab, aber da es sich bei dem 3-d-Koordinatentisch um Frequenzen weit unter 1 KHz handelt, ist der Fehler weit unter 1 % /7/.

$$\epsilon_p = \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{f}{f_r}\right)^2} - 1 \right) \cdot 100 \%$$

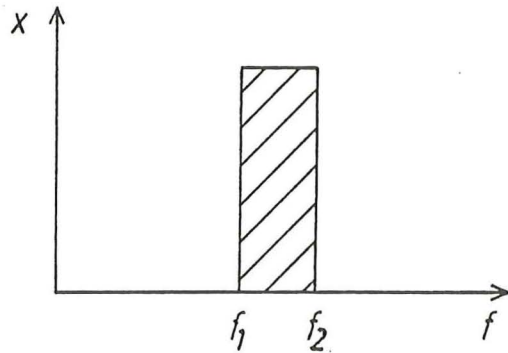
$$\text{z.B. } f = 500 \text{ Hz}$$

$$\epsilon_p = 0,31 \%$$

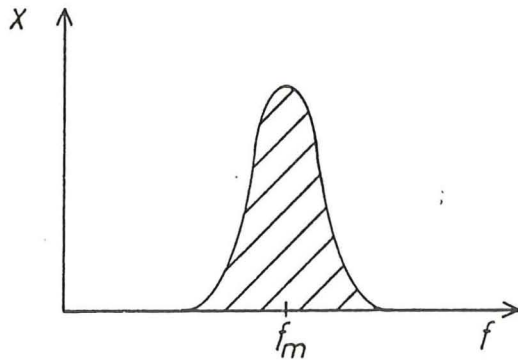
10. Spektrumanalysator

Das Ausgangssignal des Schwingungsaufnehmers kann sowohl auf einem Zeigerinstrument visuell ausgegeben werden, oder auf dem Bildschirm eines Spektrumanalysators, entweder in Gestalt von zeitlichen Abläufen oder als analysierte Spektren.

Das Signal, das viele Frequenzen enthält, wird nun durch Filter geschickt, die im Idealfall einen bestimmten Frequenzbereich mit einer Dämpfung von Null durchlassen, während alle übrigen Frequenzen mit einer unendlichen Dämpfung zurückgehalten werden /7/.






Ideale Filtercharakteristik



Reale Filtercharakteristik

Bild 17 ideale und reale Filtercharakteristik /7/

Es stehen 3 Bandpaßformen zur Verfügung:

- | | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Flat Top |  | Gute Genauigkeit bei der Messung von Amplituden. |
| Uniform |  | Bringt gute Übereinstimmung mit Flächen oder rechteckigen zeit-gewichtigen Funktionen. |
| Hanning |  | welches die optimale Genauigkeit bei der Frequenzauflösung bringt. |

Hanning wurde gewählt, wegen der hohen Frequenzauflösung im Gegensatz zu den anderen Bandpaßformen.

Die periodischen Vorgänge der Maschinenteile, die durch Krafte-
regung erzeugt werden, lassen sich in Form von Fourier-Reihen $f(\varphi)$
beschreiben.

$$f(\varphi) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos k\varphi + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k\varphi \quad (10.2)$$

harmonische Schwingungen gleicher Frequenz lassen sich zusammen-
fassen zu

$$f(\varphi) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(K \cdot \varphi + y_k) \quad (10.3)$$

Wobei $C_0 = A_0$ ist

$$C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$$
$$\tan y_k = \frac{A_k}{B_k}$$

Die einzelnen Glieder der Summe nennt man die Harmonischen. Die
Parameter A_k , B_k , C_k sind die Fourier-Koeffizienten /4/.

Nun besteht das Signal aus Sinusförmigen Komponenten unterschiedlicher
Frequenz. Es interessiert neben den Frequenzen noch die Höhe der
Amplituden.

Um das analysieren zu können, muß es erst gleichgerichtet
werden, weil sonst das Integral über eine Periodendauer der
Schwingung gleich Null ergeben würde (Bild 18). Man kann
wählen zwischen Mittel-, Effektiv- (RMS)- oder Scheitelwert
(Peak) eines Wechselspannungssignals. Es wurde der Effektiv-
wert benutzt, weil es für den Energieinhalt des Signals re-
präsentativ ist.

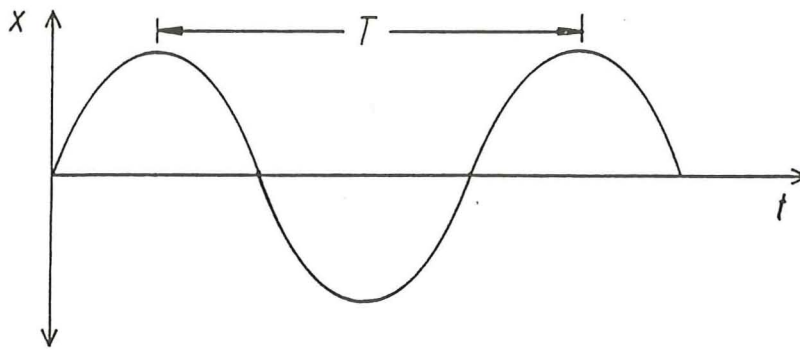


Bild 18 Zeitsignal

$$x_{\text{mittel}} = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt \quad \text{halber Spitze-Spitze-Wert}$$

$$x_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad \text{radizierter Quadrat-Mittelwert} \quad (10.1)$$

$$x_{\text{eff}} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot x_{\text{mittel}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot x_{\text{peak}} \quad (\text{nur f\"ur Sinusf\"ormige Funktionen})$$

Die analysierten Spektren oder die Zeitabläufe werden digitalisiert und können in einem Computer gespeichert werden.

Wegen der enormen Spannweite der zu messenden Schwingungsamplituden wird eine relativierte logarithmische Skala benutzt, welche als Pegel bezeichnet wird. Nach dem Amerikaner A.G. Bell wird sie wie eine Einheit gebraucht. Um besser das logarithmische Verhältnis handhaben zu können, wird es einfach mit 10 multipliziert und es entsteht das Dezibel.

Das logarithmische Verhältnis wird definiert durch:

$$\text{dB} = 10 \lg \frac{a^2}{a_{\text{Bez}}^2}$$

a^2 = gemessene Intensität

a_{Bez}^2 = eine Bezugsintensität

daraus folgt die Beziehung:

$$\text{dB} = 20 \lg \frac{a}{a_{\text{Bez}}}$$

Damit die Spektren, die nur relativ logarithmisch vorliegen, in absolute Werte umgerechnet werden können, wurde eine Eichkurve des Aufnehmers aufgezeichnet.

Zur Verfügung stand ein: A c c e l e r o m e t e r Calibrator, der den Aufnehmer in Schwingung mit $\omega = 500 \text{ Hz}$

$$f = \frac{500 \frac{1}{s}}{2 \pi} = 79,6 \text{ Hz}$$

versetzte und eine maximale Beschleunigung von $1g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ Intensität wirken läßt/7/.

Wie aus Bild 19 erkenntlich ist für 1 g

$$\text{dB} = - 18 = 20 \lg \frac{a}{g}$$

$$a = g \cdot 10^{\frac{18 + \text{dB}}{20}} \quad (10.5)$$

Die nächste Harmonische ist vernachlässigbar klein:

$$\text{dB} = - 61$$

$$a = 0,07 \text{ ms}^{-2}$$

Calibrierungskurve des Beschleunigungsaufnehmers

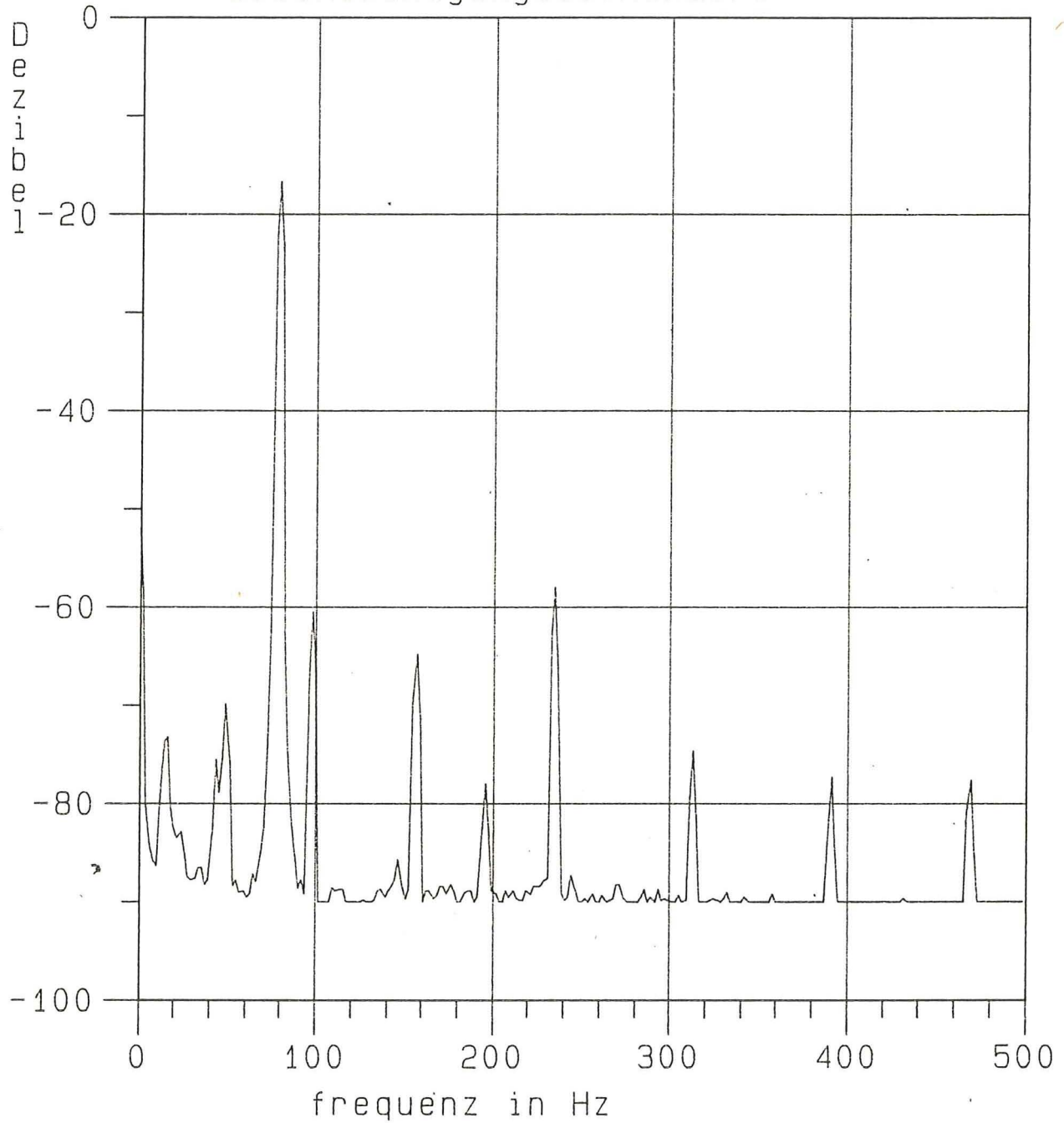


Bild 19

11. Messungen an dem 3-d-Koordinaten-Meßtisch bei verschiedenen Ausgangsspannungen des Positioniercontrollers mit dem Beschleunigungsaufnehmer an der X-Achse.

Die Messungen wurden ausgeführt mit der Empfindlichkeit des Aufnehmers in Z-, Y-, und X-Richtung, um sicherzustellen, daß keine Resonanzfrequenzen in allen drei Richtungen auftreten. Weiterhin wurde ein Unterschied der Frequenzspektren gemessen, in Abhängigkeit des Y-Schlittens, wenn in X-Richtung gefahren wurde.

Festlegung der Fahrrichtung des Tisches siehe Bild 9.

Die Empfindlichkeitsrichtung des Beschleunigungsaufnehmers siehe Bild 20.

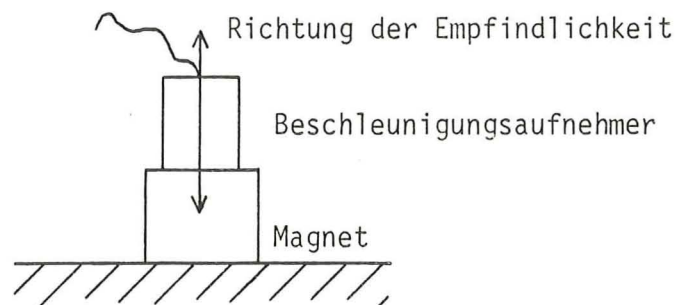


Bild 20 Empfindlichkeitsrichtung

11.1 Aufnehmerempfindlichkeit in Z-Richtung

Bei der Aufnahme der Spektren bei z.B. 1 V einmal mit Y in positiver Stellung (Bild 21) und einmal mit Y in negativer Stellung (Bild 22).

Stellung der Y-Achse siehe Bild 9

Es ist deutlich zu erkennen, daß das Bild 22 wesentlich mehr Frequenzen zwischen 1500 Hz und 2000 Hz enthält.

Die Aufnahme wurde mit der in positiver Richtung gefahrenen X-Achse gemacht, und es wurde die Aufnehmerempfindlichkeit in Z-Richtung gesetzt.

Weiterhin wurde festgestellt, daß jeweils die Fahrrichtung des Schlittens auch wieder verschiedene Frequenzspektren lieferte.

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

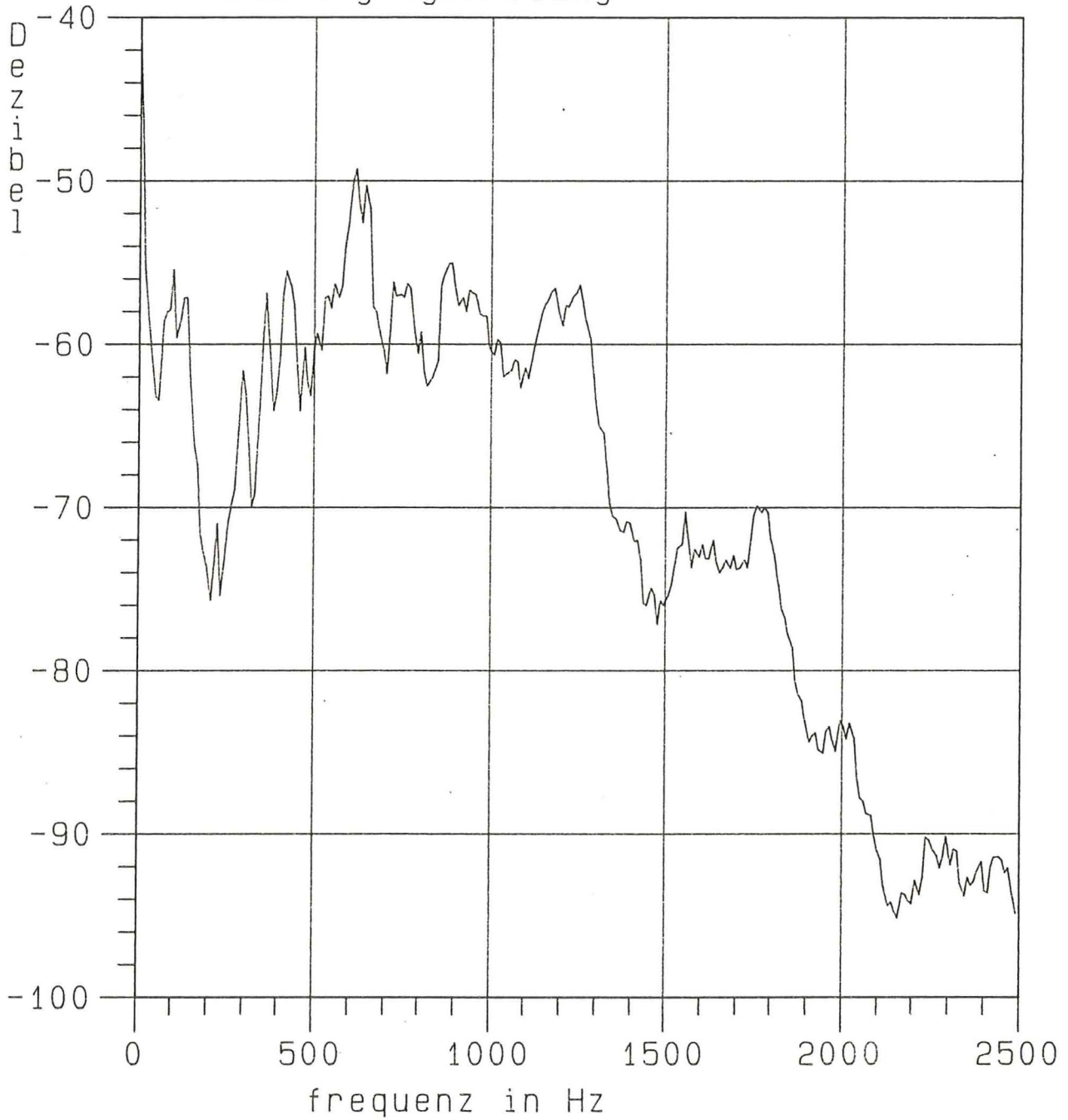


Bild 21

Frequenzanalyse der X-Achse bei 1 V

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

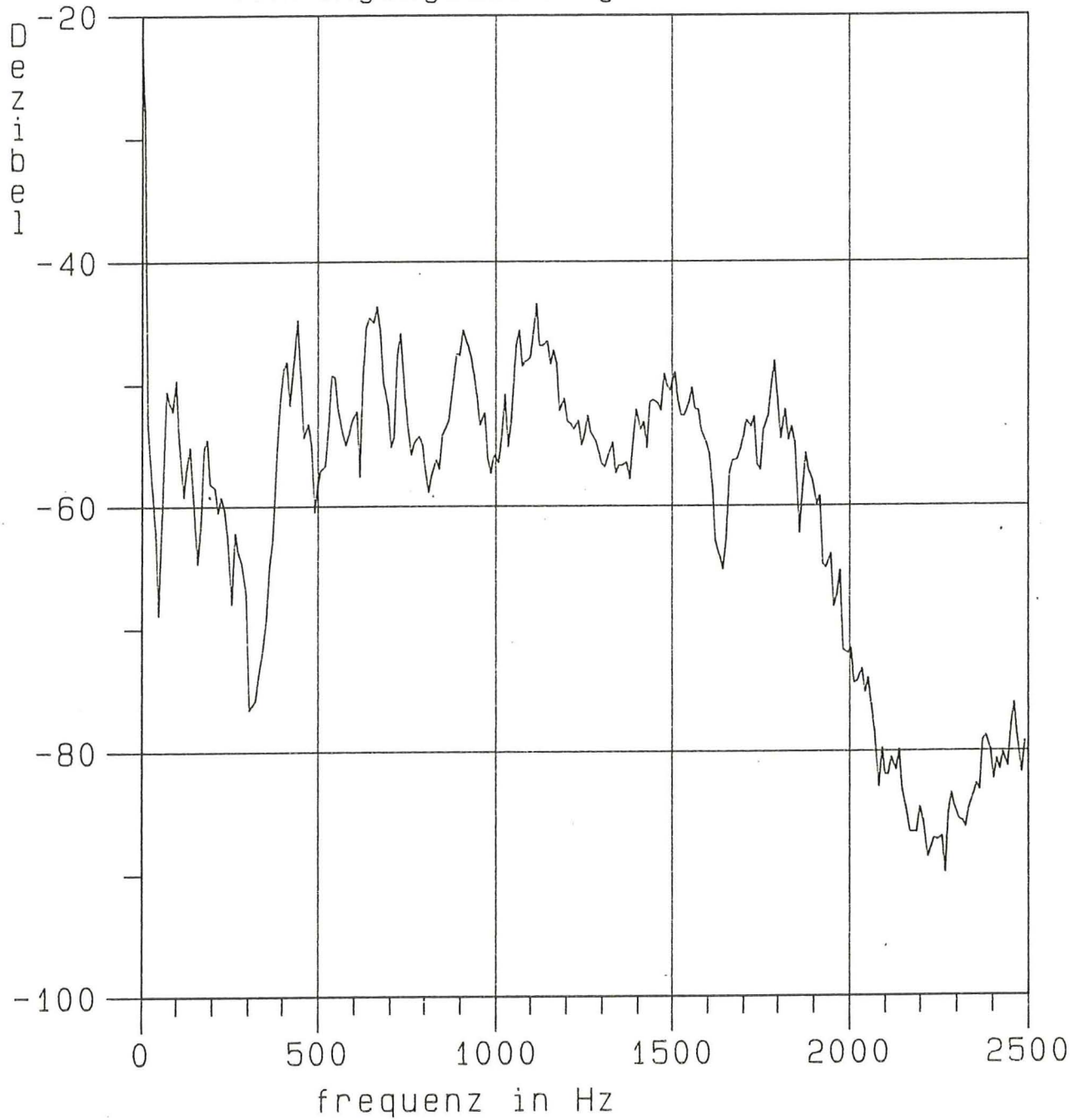


Bild 22

Frequenzanalyse X-Achse bei 1 V

Deutlich wurde diese Erscheinung bei 6 V Ausgangsspannung. Einmal wurde der Tisch der X-Achse in positiver (Bild 23) und einmal in negativer (Bild 24) Richtung gefahren. Der Tisch der Y-Achse wurde jeweils in positive Stellung gebracht.

Die Amplituden bis 1 KHz und oberhalb 3 KHz sind in Bild 24 stärker ausgeprägt als in Bild 23.

Leichte mechanische Unterschiede des Tisches bringen schon unterschiedliche Spektren. Zur Bestimmung des Betriebszustandes des Tisches eignet sich eine Analyse von Frequenzspektren nicht. Man gewinnt keine Informationen über die Störquelle. Sie ist nur sinnvoll, wenn über einen größeren Zeitraum mehrere Spektren seriell aufgenommen werden und miteinander verglichen werden.

Dabei sollte der Schwingungspegel des Tisches von dem man weiß, daß er sich in einem guten Zustand befindet, als Standard angesehen werden. Einen Hinweis über einen beginnenden Schadensfall findet man, wenn bei einzelnen Spektralkomponenten eine Pegeländerung erfolgt ist. Dies ermöglicht einen Wartungsplan zu erstellen noch lange bevor die Maschine ausfällt.

Es werden verschiedene Gefahrenklassen eingeführt, die in "gut", "brauchbar", "noch zulässig" und "unzulässig" eingeteilt werden. Die Abstände betragen erfahrungsgemäß 8 dB. Es genügt also eine Änderung von 20 dB, um von der Klasse "gut" in "unzulässig" zu gelangen/7/.

Die aufgezeichneten Spektren können als Standardspektren aufgefaßt werden und der Gefahrenklasse "gut" zugeordnet werden.

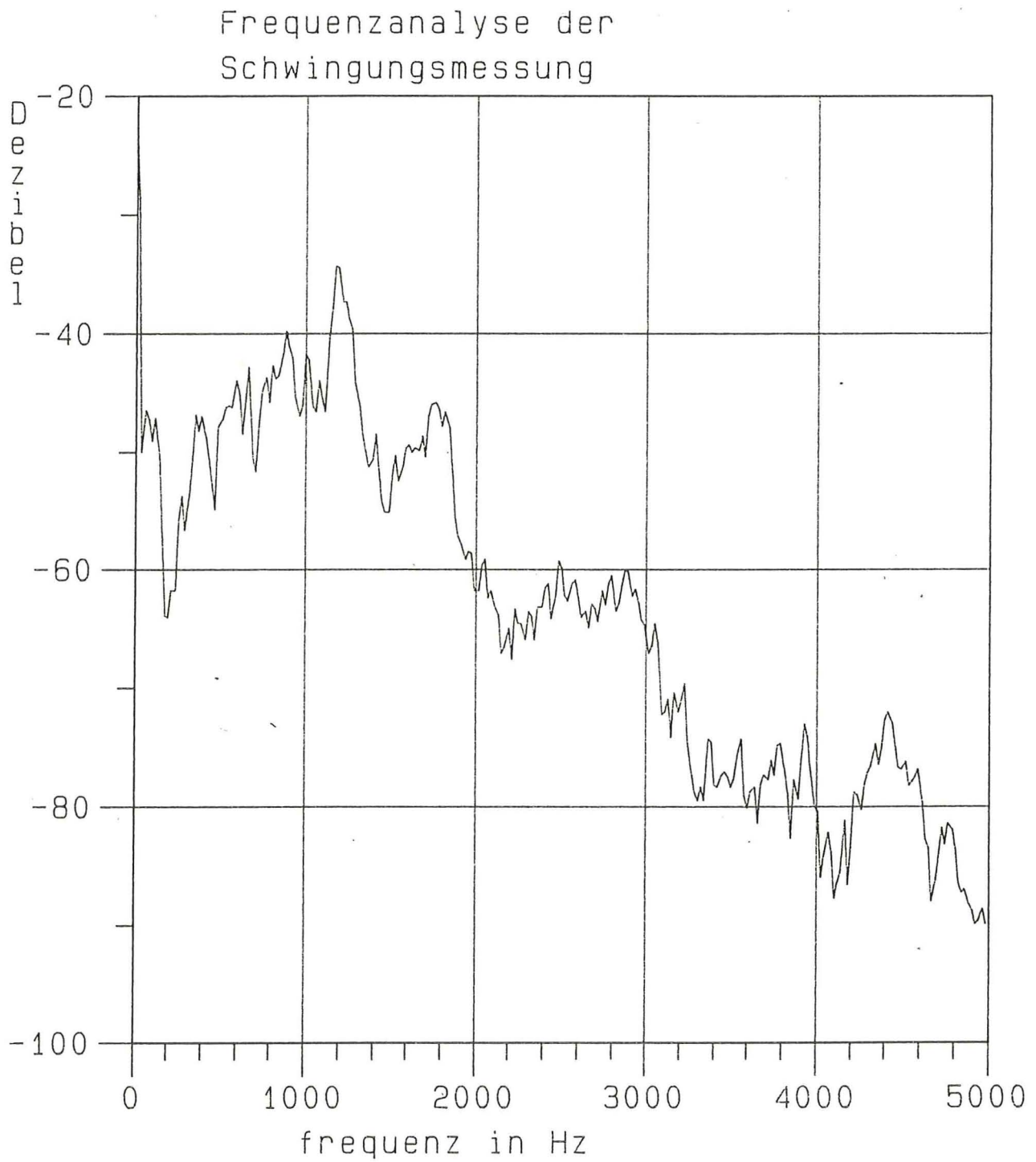


Bild 23

Frequenzanalyse der X-Achse bei 6 V

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

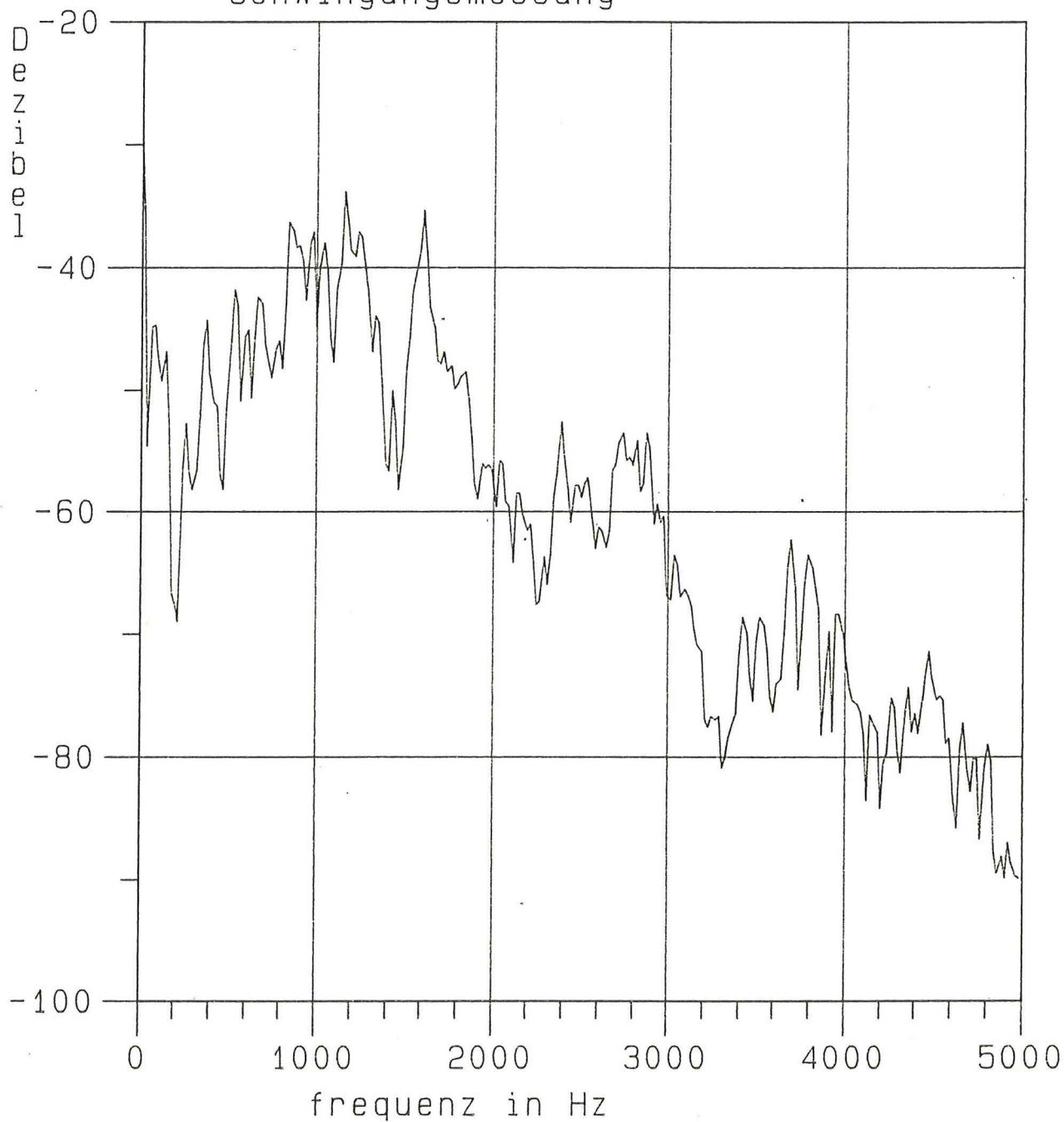


Bild 24

Frequenzanalyse der X-Achse bei 6 V

Die Drehzahlfrequenz der Spindel und deren Einfluß auf die Frequenzspektren wurde bei der maximalen Drehzahl untersucht.

Die maximale Geschwindigkeit der X-Achse (Tabelle 1a) beträgt
 $v = 16450 \text{ mm/min} \cong 274,16 \text{ mm/s}$.

Die Gangzahl der Spindel beträgt 4 und die Steigung pro Umdrehung entspricht $s = 4 \text{ mm}$.

Die Drehfrequenz ist:

$$f = \frac{v}{s} = \frac{274,16 \text{ mm}}{4 \text{ mm s}}$$

$$f = 68,54 \text{ Hz}$$

$$f_g = f \cdot 4 \quad \text{wegen 4-facher Gangzahl}$$

$$f_g = 274 \text{ Hz}$$

z.B. Bild 25 entspricht einem Spektrum, das bei maximaler Drehzahl der X-Achse aufgenommen wurde.

Die zuvor berechneten Frequenzen sind auf Bild 25 nicht zu erkennen, auch nicht ihre Harmonische f_h

$$f_h = n \cdot f$$

$$f_g = \text{Grundfrequenz}$$

$$n = \text{Ganzzahliges vielfaches (1, 2, 3 \dots n)}$$

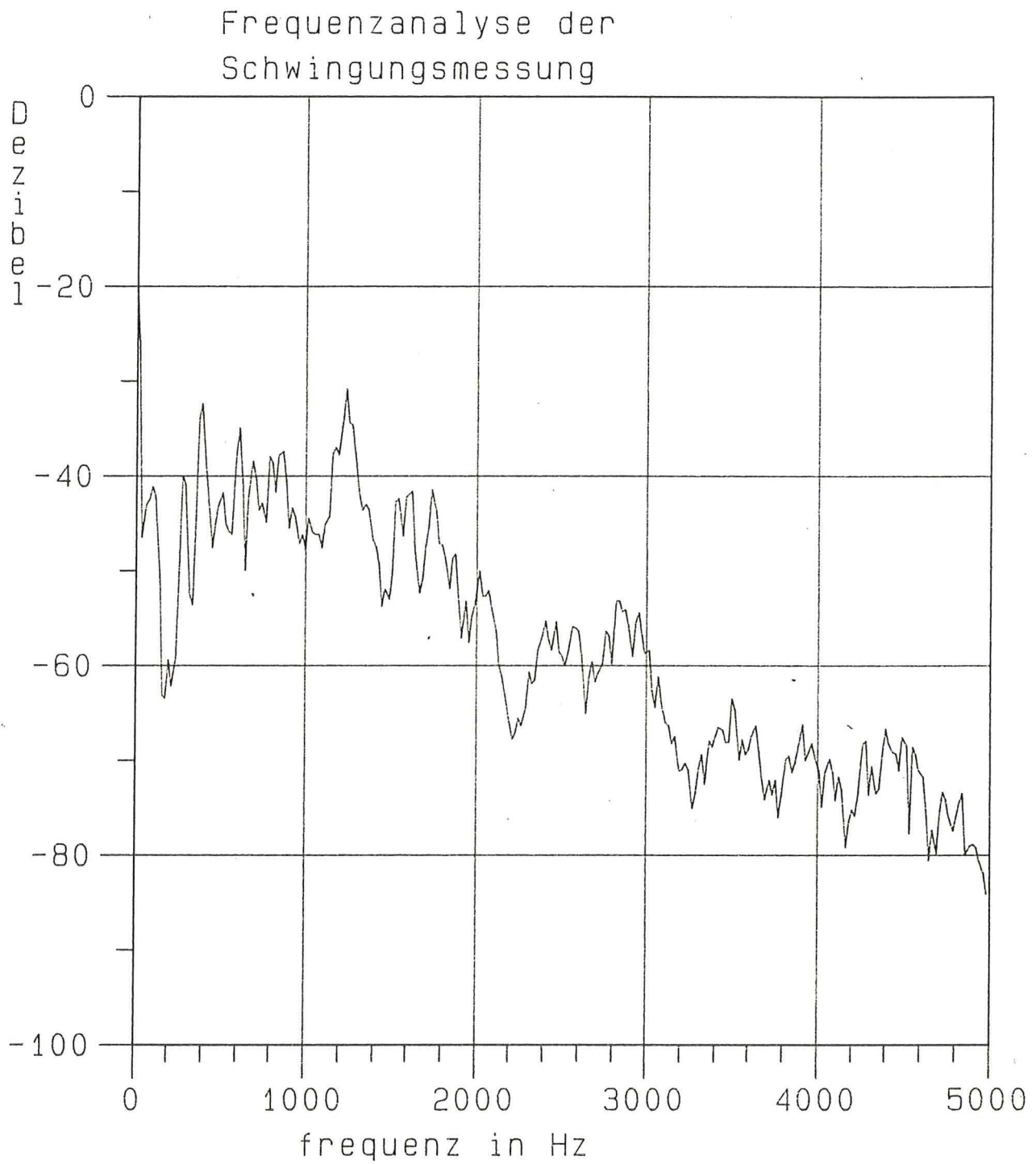


Bild 25

Frequenzanalyse der X-Achse bei 10 V

Die Flachführungen des Tisches ermöglichen die Aufnahme der Gewichts- und Massenkräfte senkrecht zur Führungsbahn. Der Hersteller hatte eine Wälzführung gewählt, wie sie bei großen und kleinen Präzisionsmaschinen eingesetzt wird. Sie zeichnet sich durch geringe Reibung, hohe Führungsgenauigkeit, leichten Lauf, lange Lebensdauer, geringe Anlaufreibung (kein Stick-Slip) im Gegensatz zu hydrodynamischen und hydrostatischen Gleitführungen aus, hat allerdings eine geringere Dämpfung quer zur Bewegungsrichtung/5/.

Die Abstände der Kugeln der Wälzlagerung betragen $r = 10 \text{ mm}$. Bei einer maximalen Geschwindigkeit von $v = 274,16 \text{ mm/s}$ betragen die möglichen Stoßimpulse:

$$f_{\text{imp}} = \frac{v}{r} = \frac{274,16 \text{ mm}}{10 \text{ mm s}}$$

$$f_{\text{imp}} = 27,4 \text{ Hz}$$

Auch diese Frequenz und das Vielfache davon ist in Bild 25 nicht besonders ausgeprägt.

Die bisher gezeigten, und auch die dazwischen liegenden Spektren, auf deren Veröffentlichung hier verzichtet wird, zeigen keine Resonanzüberhöhungen, welches also positiv zu bewerten ist.

Ein Ansteigen des allgemeinen Schwingungspegels von $\approx -45 \text{ dB}$ (Bild 22; bei 1 V und $\approx -30 \text{ dB}$ (Bild 25) bei 10 V Ausgangsspannung ist zu beobachten.

Die Untersuchung des Schwingungsverhaltens der X-Achse unterhalb 1 V Ausgangsspannung und Aufnehmerempfindlichkeit in Z-Richtung ergeben für 0,4 V (Bild 26), für 0,6 V (Bild 27) und für 0,8 V (Bild 28).

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

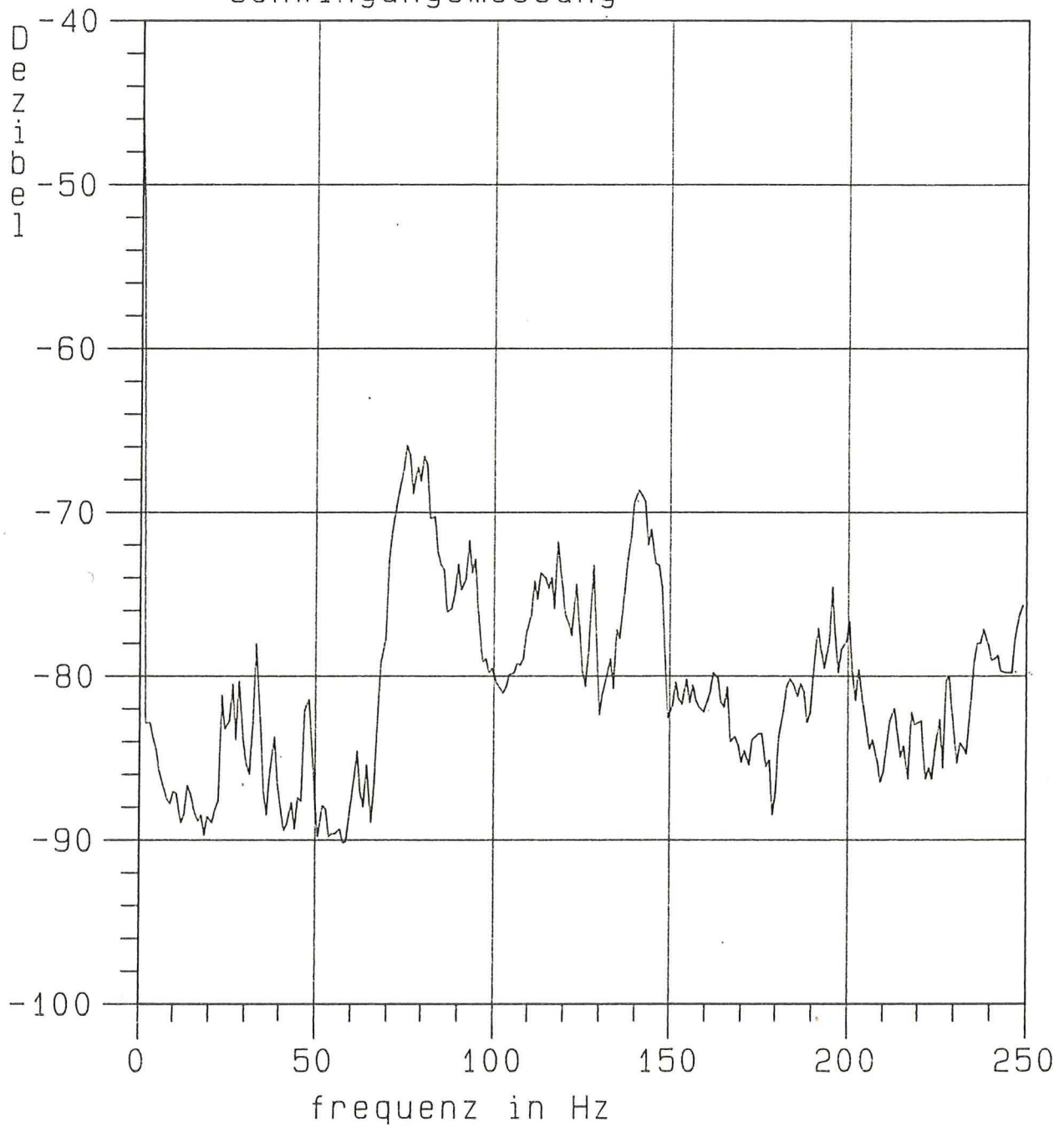


Bild 26

Frequenzanalyse der X-Achse bei 0,4 V

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

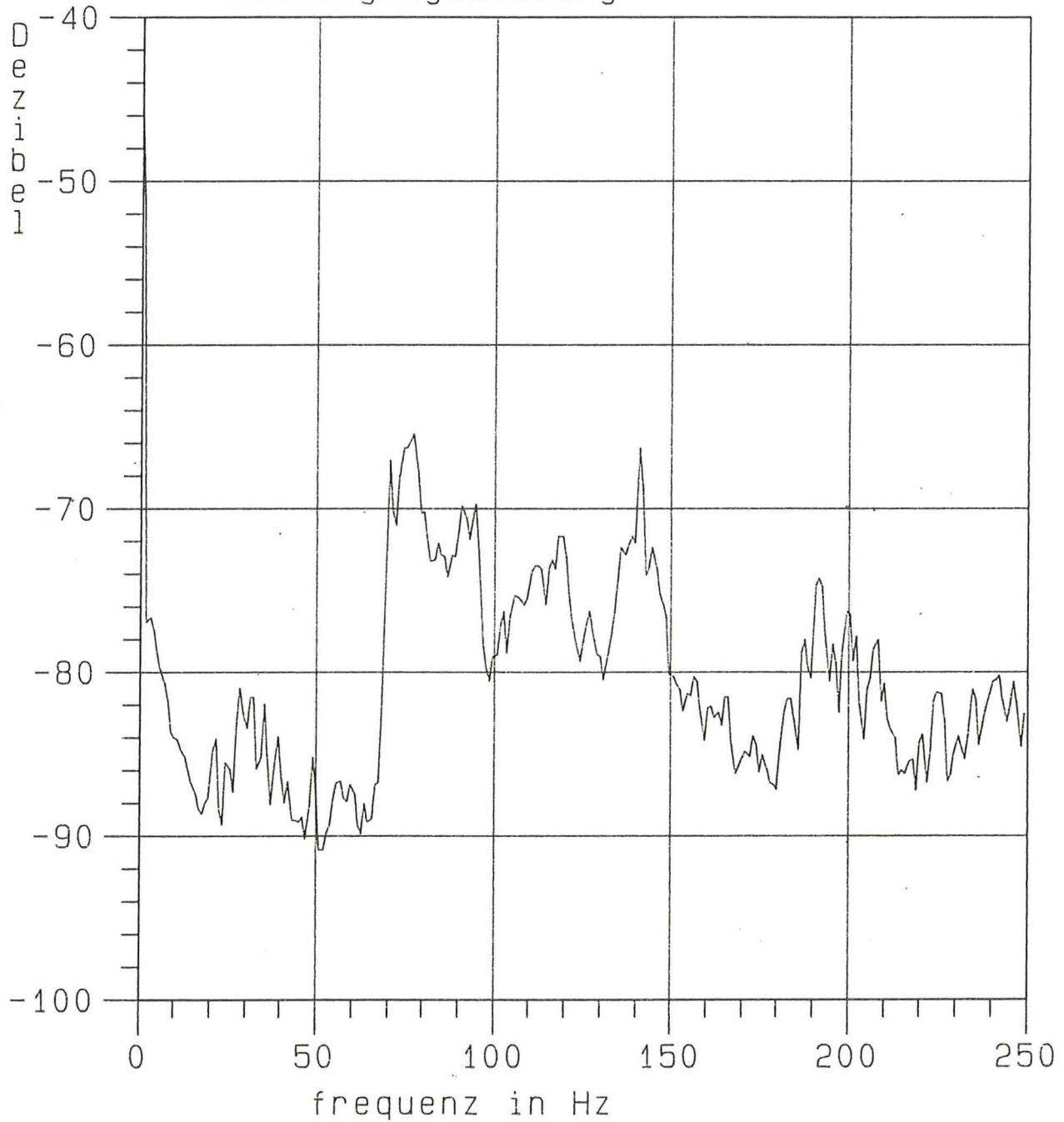


Bild 27

Frequenzanalyse der X-Achse bei 0,6 V

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

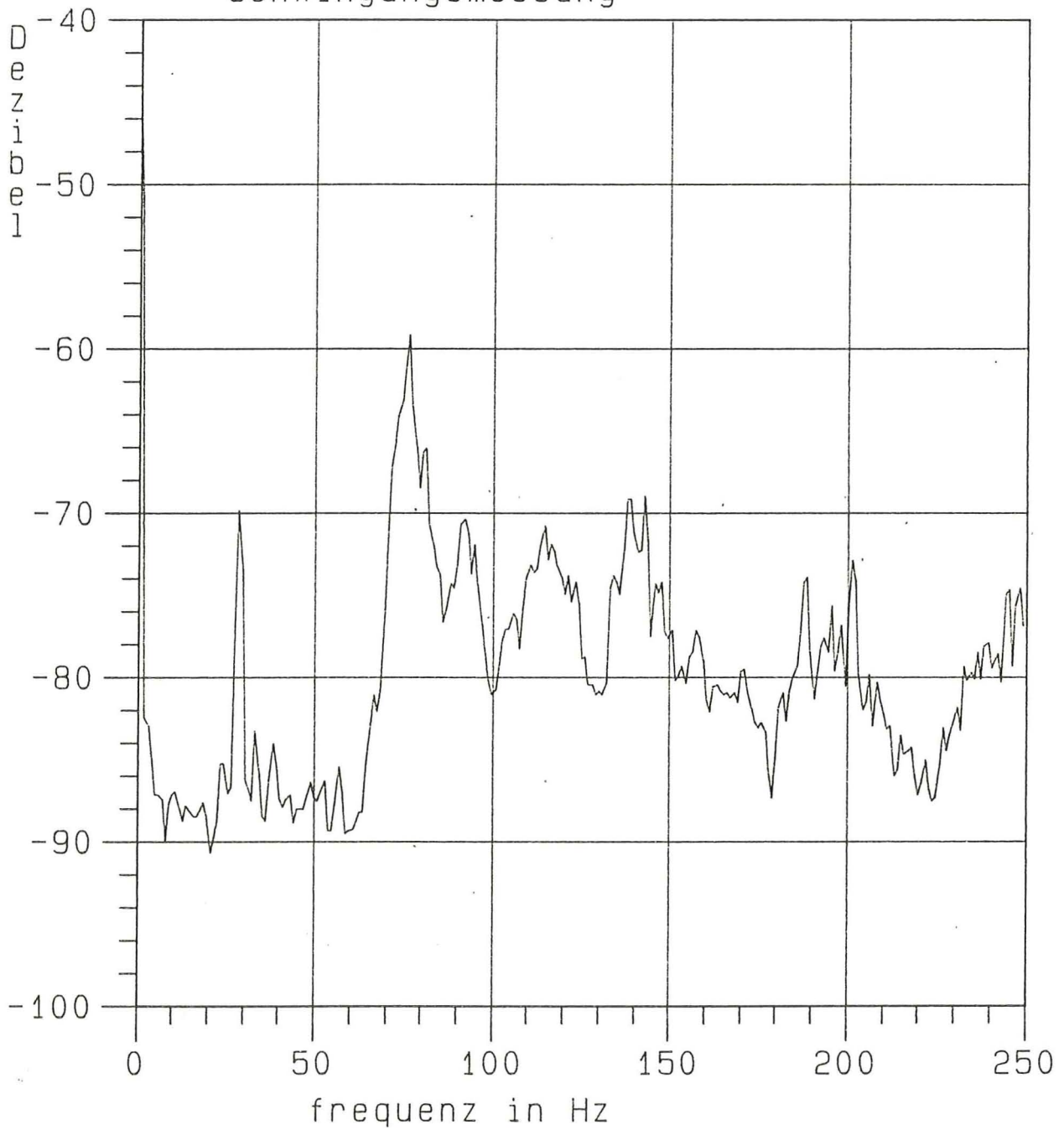


Bild 28

Frequenzanalyse der X-Achse bei 0,8 V

Es ist zu erkennen, daß der Pegel auch hier noch weiter bis auf $\approx - 65$ dB abgesunken ist, aber in Bild 28 sind zwei Überhöhungen, einmal bei 28 Hz und einmal bei 54 Hz zu beobachten. Diese Geschwindigkeit bei 0,8 V sollte nur in Ausnahmefällen gefahren werden, 0,6 V wird empfohlen.

11.2 Aufnehmerempfindlichkeit in Y-Richtung

Bei der Schwingungsmessung in Y-Richtung, wobei in X-Richtung gefahren wurde, konnten keine wesentlichen Abhängigkeiten von der Stellung YP oder YN der Y-Achse und keine Abhängigkeiten von der Fahrriichtung XP oder XN der X-Achse auf die Frequenzspektren festgestellt werden. Also wurde die Y-Achse in der Mittelstellung YM positioniert (Bild 9).

In Bild 29, das bei 1 V entstanden ist, wird eine Amplitudenüberhöhung bei 3,2 KHz beobachtet, die bei 2 V Ausgangsspannung (Bild 30) wieder verschwunden ist. Dieses Phänomen wird als "Anhakmöglichkeit" der Mechanik bei dieser Geschwindigkeit erklärt. Diese Geschwindigkeit kann ebenfalls nicht empfohlen werden, aber wegen des kleinen Pegels von $\approx - 83$ dB kaum störend wirken.

Erwähnenswert bleibt die Tatsache, daß der gesamte Pegel bei 7 V kleiner ist als bei 6 V Ausgangsspannung.

Bild 31 mit 6 V Ausgangsspannung

Bild 32 mit 7 V Ausgangsspannung

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

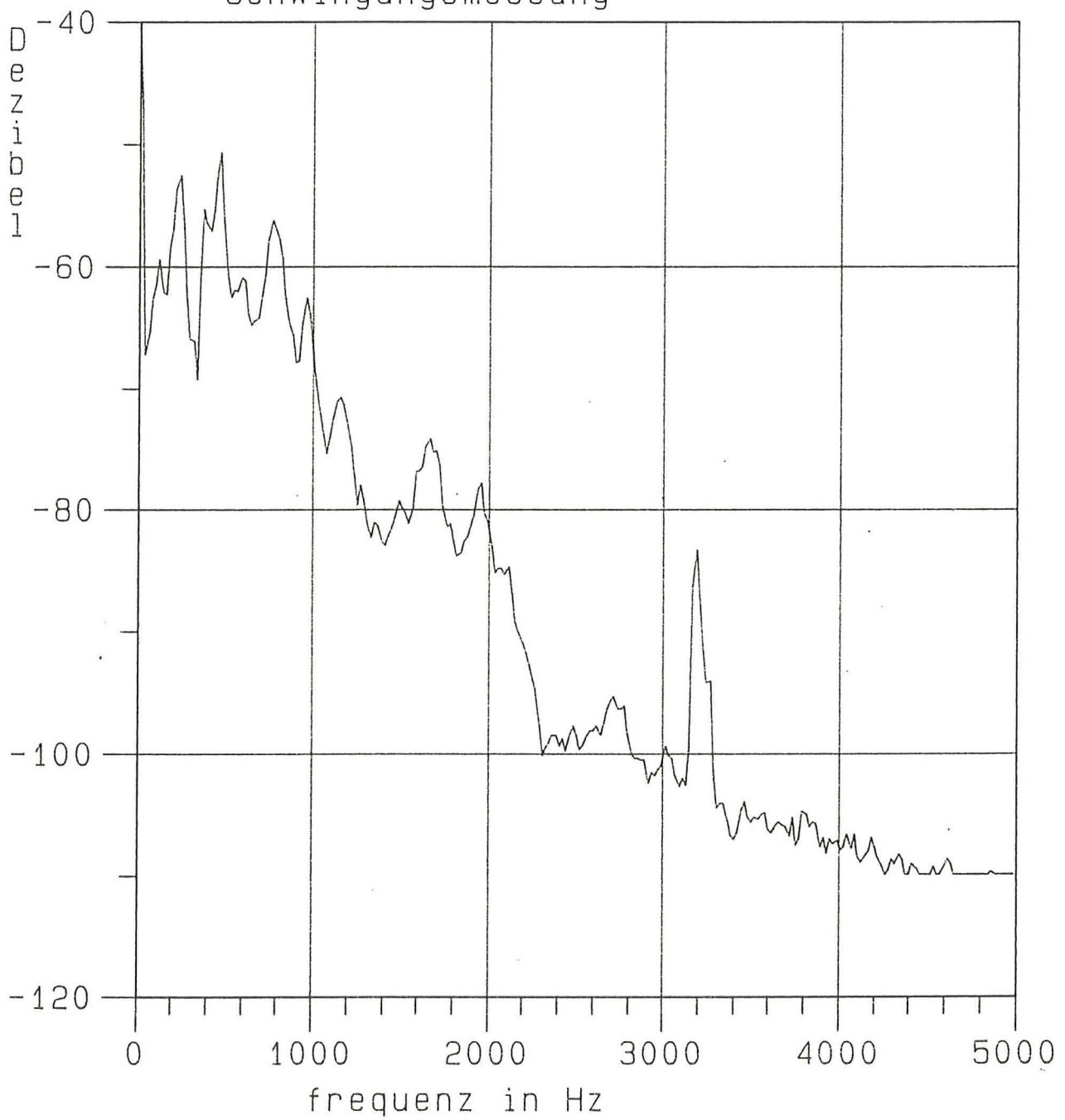


Bild 29

Frequenzanalyse der X-Achse bei 1 V

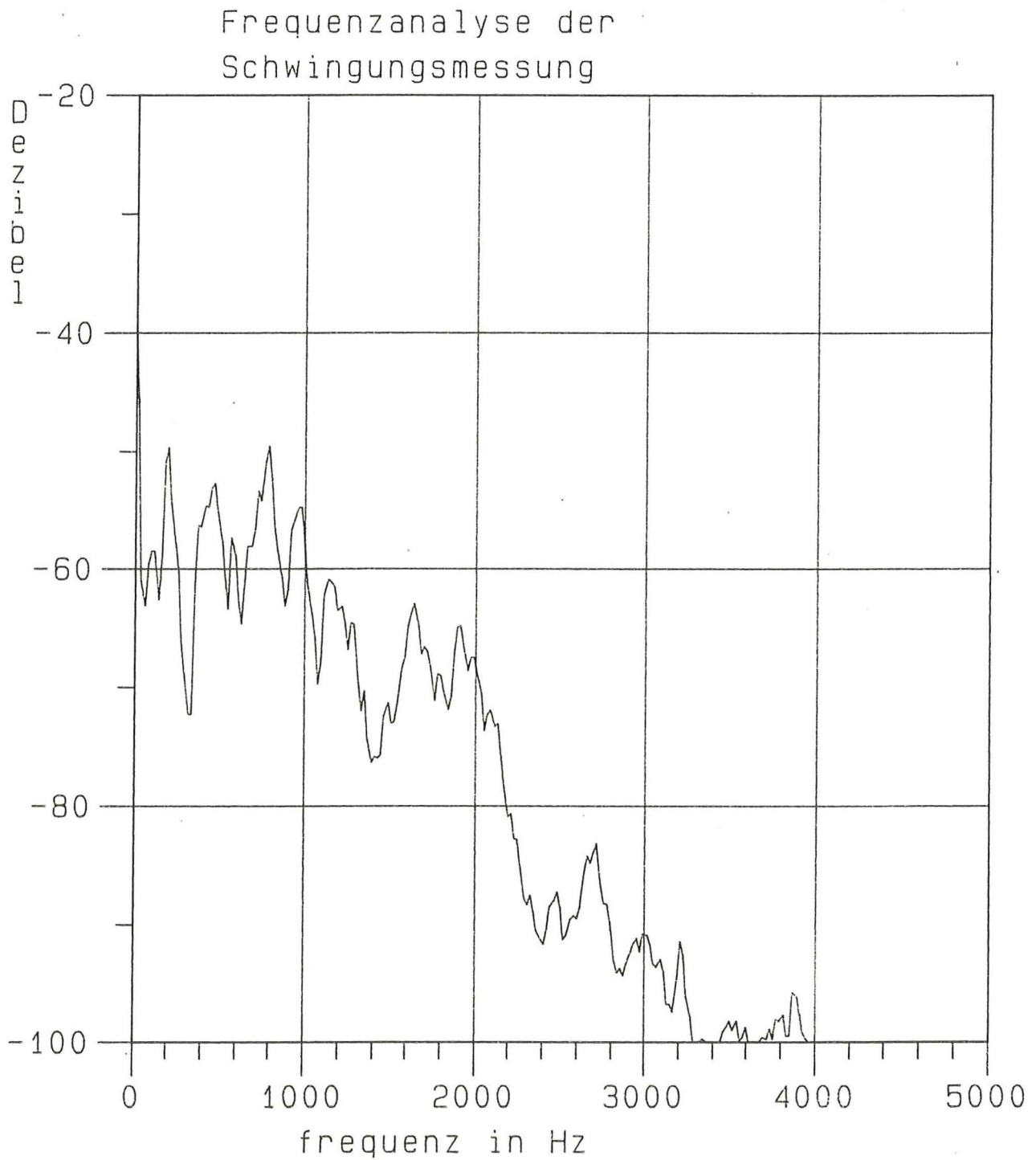


Bild 3o

Frequenzanalyse der X-Achse bei 2 V

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

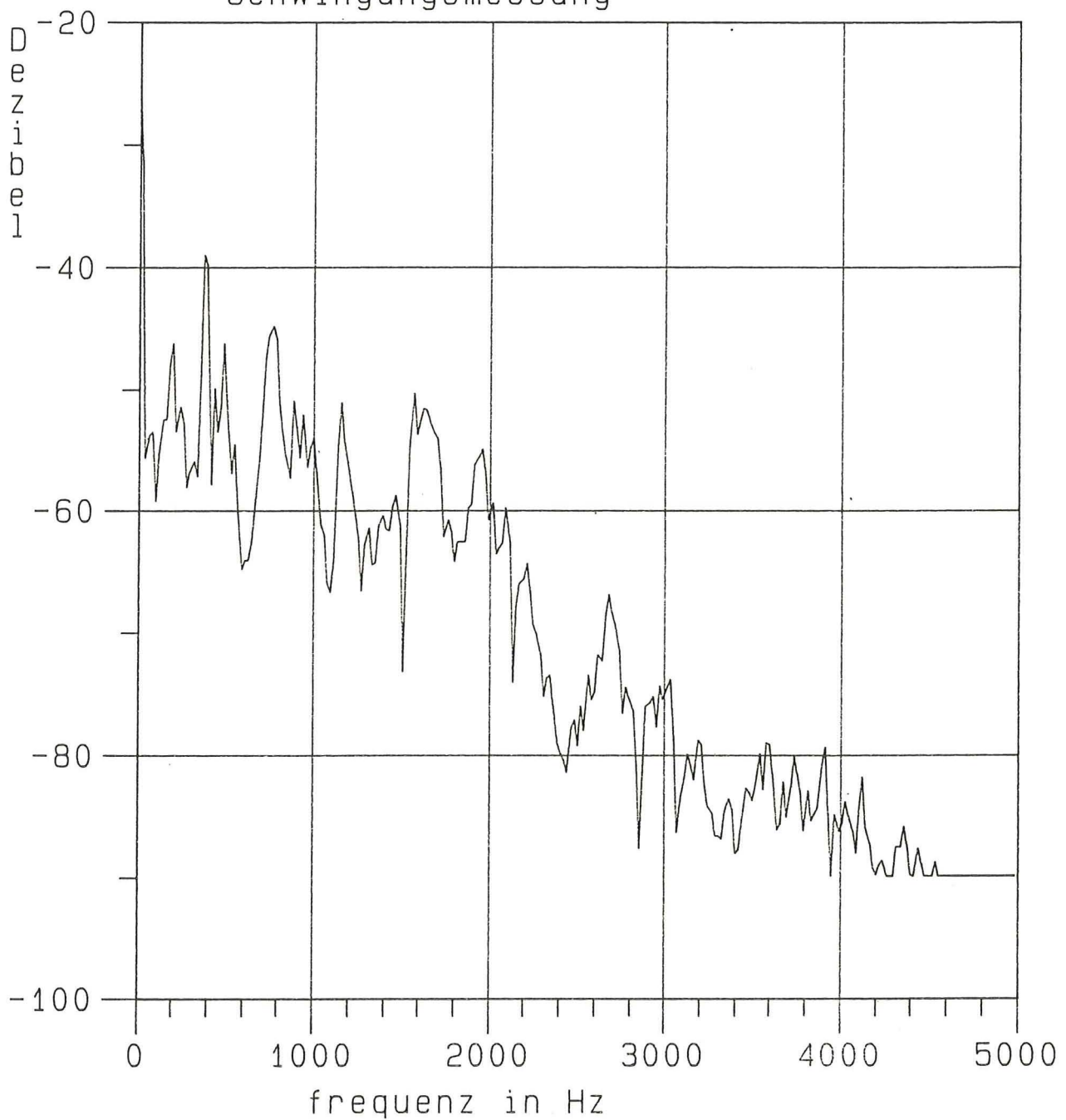


Bild 31

Frequenzanalyse der X-Achse bei 6 V

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

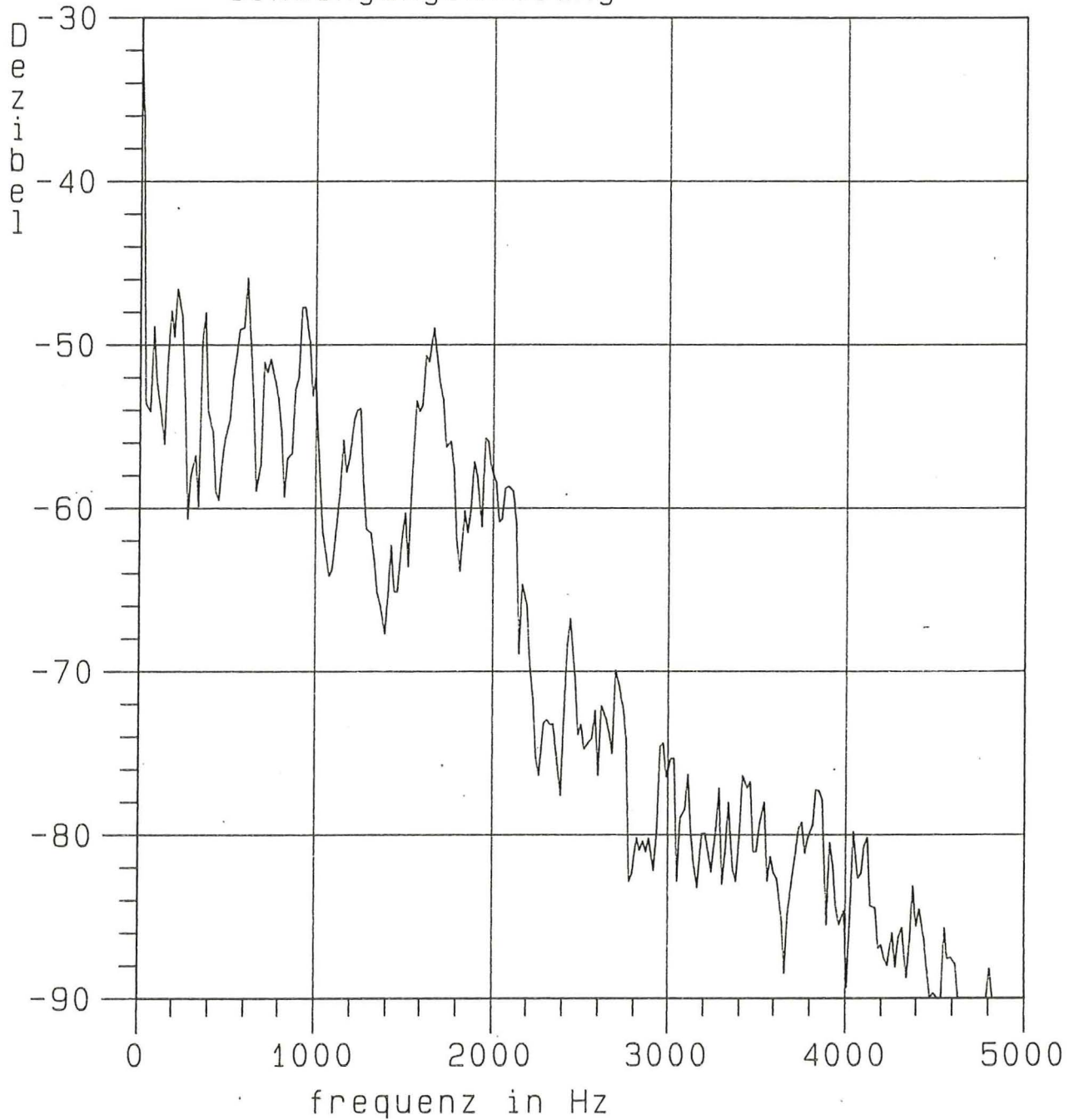


Bild 32

Frequenzanalyse der X-Achse bei 7 V

Erst das Spektrum bei der Ausgangsspannung 8 V hat ungefähr das gleiche Niveau wie das Spektrum bei 6 V.

In Bild 33 ist der Unterschied zwischen 1 V und 10 V Ausgangsspannung direkt zu erkennen.

Die Spitzen sind bei 10 V sehr stark angewachsen und ab etwa 1 KHz ist das Untergrundrauschen wesentlich höher als bei 1 V.

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

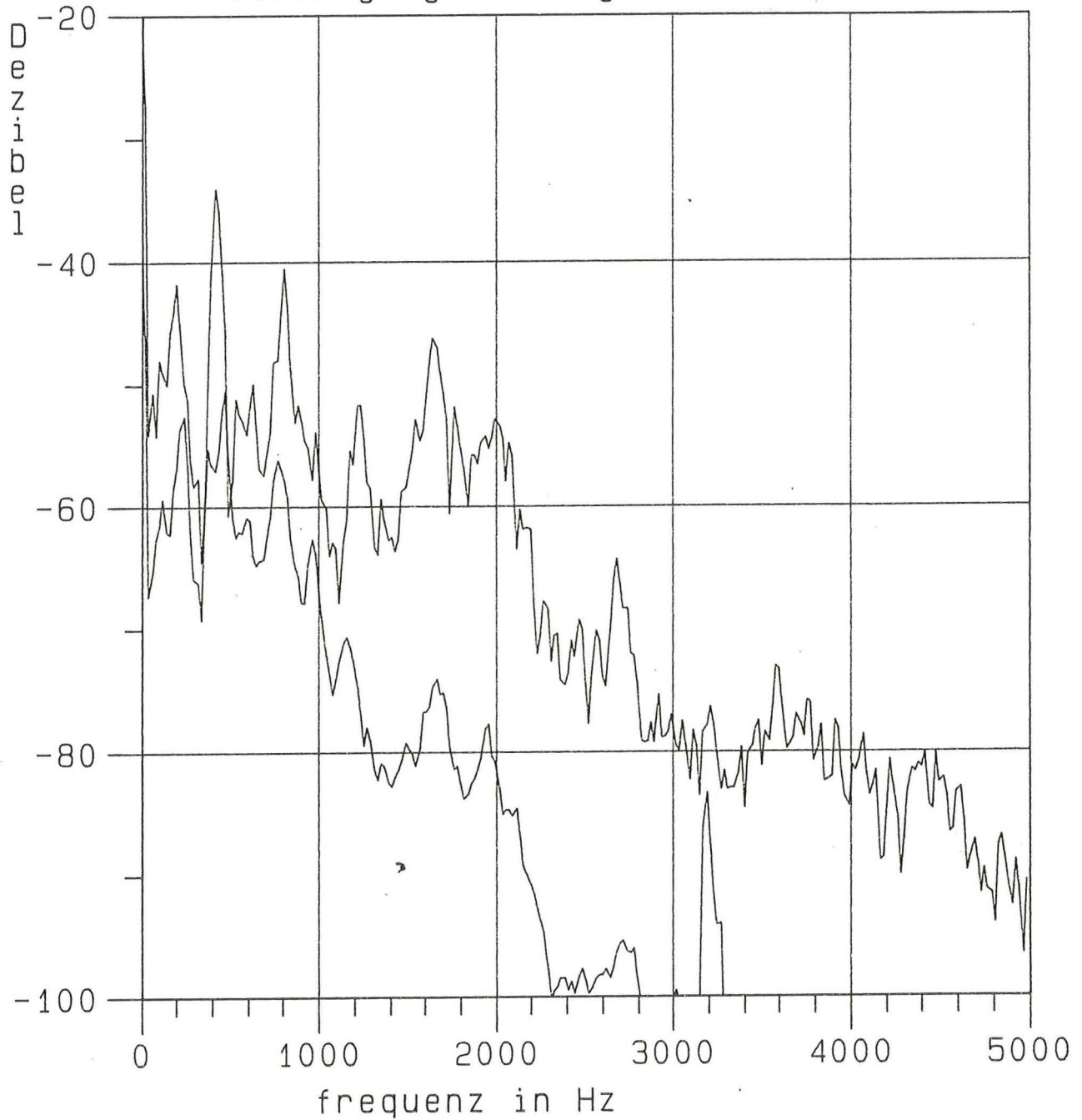


Bild 33

Frequenzanalyse der X-Achse bei 1 V und bei 10 V

11.3. Aufnehmerempfindlichkeit in X-Richtung

Bei der Messung der Schwingungen in X-Richtung also in Fahr-
richtung fällt besonders eine starke Überhöhung bei etwa 150 Hz
auf. Bild 34 zeigt das Spektrum bei 1 V Ausgangsspannung.

Die Überhöhung fällt bei 4 V Ausgangsspannung wieder stark ab.
(Bild 35)

Bei 9 V Ausgangsspannung ist diese Überhöhung bei seinem
Maximum angelangt (Bild 36) es beträgt ≈ -25 dB, das sind
absolut

$$a = 9,81 \cdot 10^{\frac{18 - 25}{20}} \text{ m/s}^2$$

$$a = 4,38 \text{ m/s}^2$$

Das ist die maximale Beschleunigung der Schwingung in X-Richtung,
die hier schon eine beachtliche Größe erhalten hat. Das ist zu be-
achten, wenn schwingfähige Systeme an den Tisch angebaut werden.

11.4 Bestimmung der optimalen Geschwindigkeit für die X-Achse

Mit dem 3-d-Koordinaten-Tisch sollen in X-Richtung, während der
Fahrt mit der Hallsonde, die Magnetfelder ausgemessen werden.

Im ungünstigsten Fall würde als Befestigung der Hallsonde ein
Rohr benutzt. Das eine Ende des Rohres wird am Tisch fest einge-
spannt während das andere Ende frei mit der Hallsonde schwebt.

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

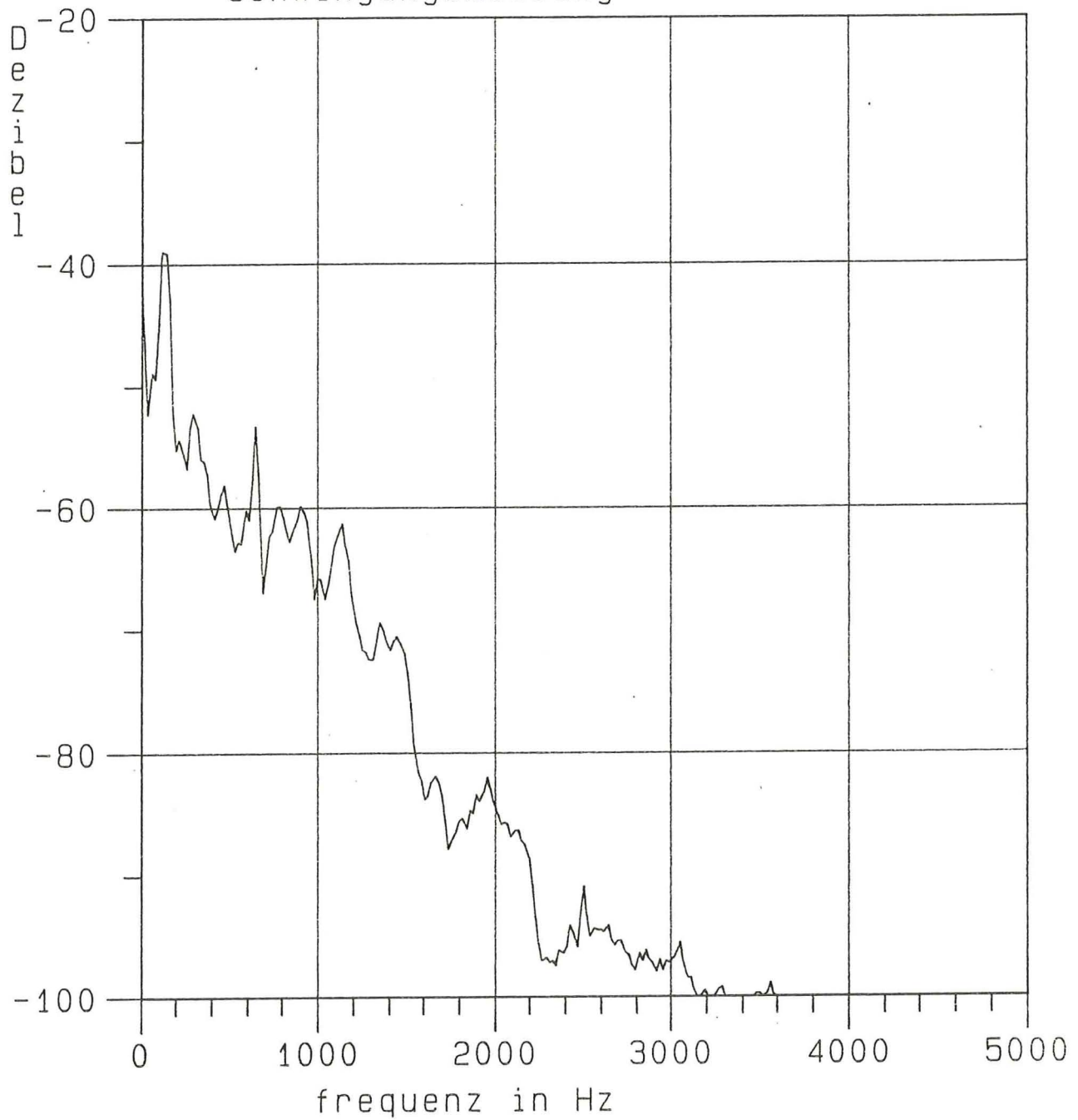


Bild 34

Frequenzanalyse der X-Achse bei 1 V

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

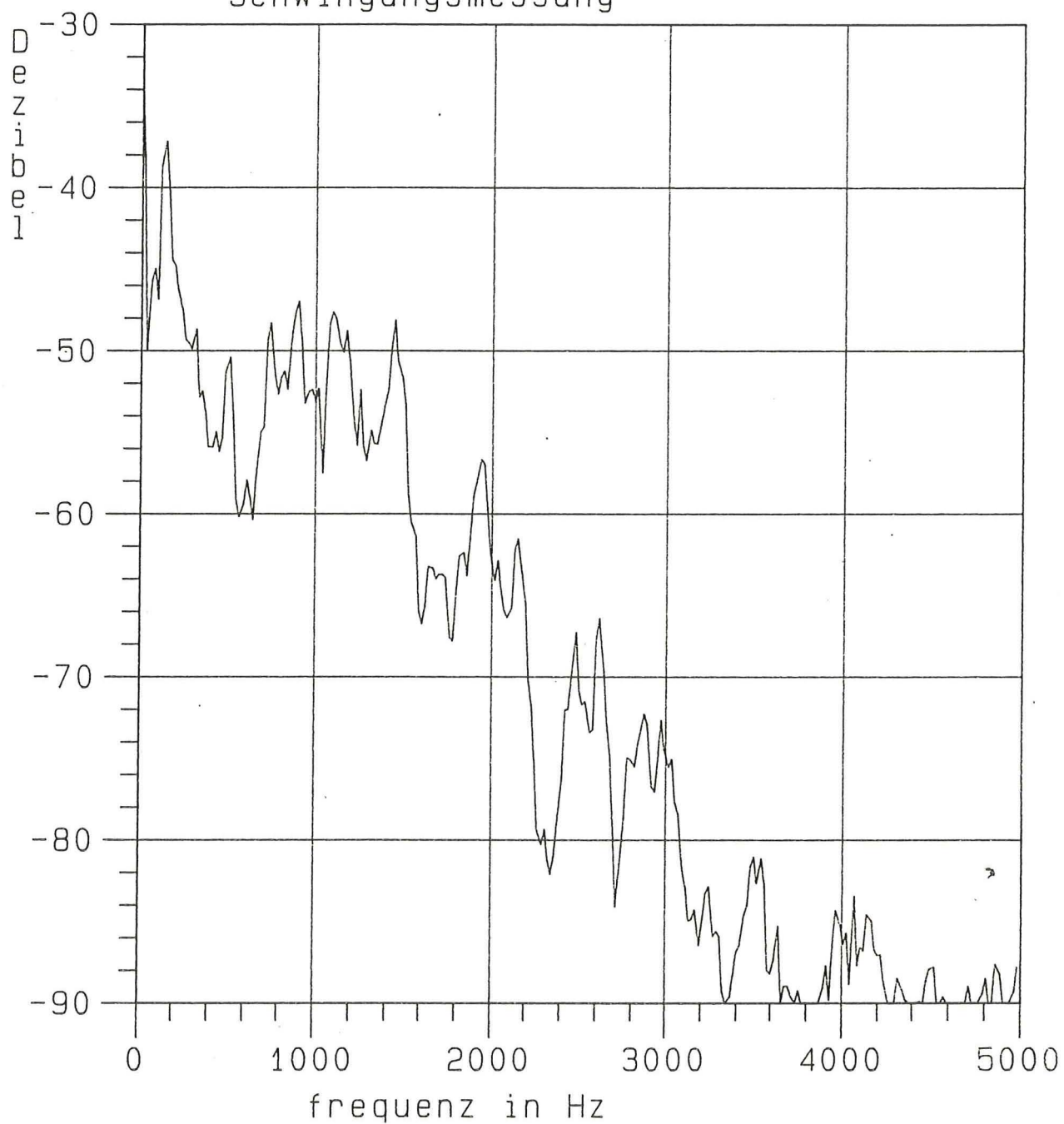


Bild 35

Frequenzanalyse der X-Achse bei 4 V

Frequenzanalyse der Schwingungsmessung

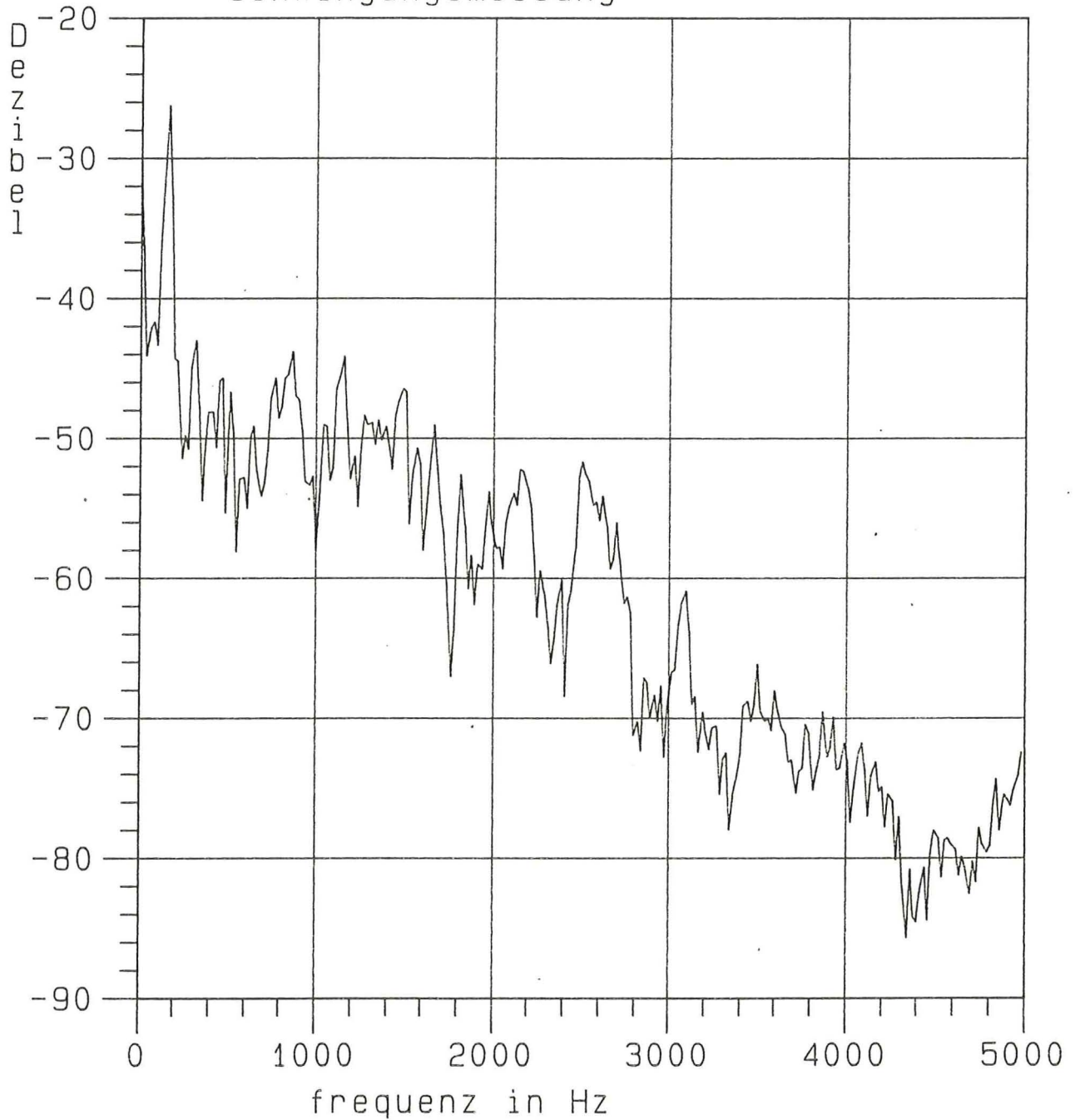


Bild 36

Frequenzanalyse der X-Achse bei 9 V

Das würde eine Eigenkreisfrequenz ω_0 von

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad \text{ergeben.}$$

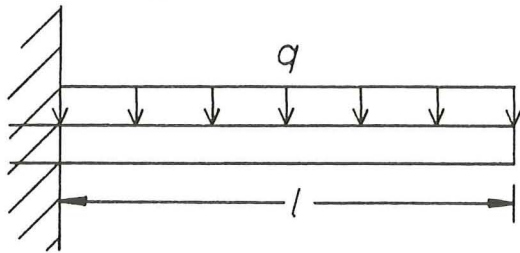


Bild 34 Haltestange

$$c = \frac{8 \ E \ I}{l^3} \quad \text{Federkonstante} \quad /6/$$

$$I = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{64} \quad \text{Flächen-Trägheitsmoment des Rohres}$$

$$m = V \cdot \rho = \frac{(D^2 - d^2) \pi l}{4} \cdot \rho$$

daraus folgt

$$\omega_0 = \frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{E}{2 \rho} \frac{(D^4 - d^4)}{(D^2 - d^2)}}$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2 \pi}$$

Dies bringt Eigenfrequenzen in der Größenordnung von 5 Hz - 10 Hz.

Es muß aber sein für:

$$f_0 > \frac{K \cdot (U_X - b_X)}{s \cdot m_X}$$

für m_x als Steigung und b_x als Konstante aus Bild 8.

Für U_x wurde wie schon vorher erwähnt 0,6 V gewählt.

$K = 5$ wurde gewählt und steht in der Beziehung

$$f = \frac{f_{\text{ost}}}{5}$$

um für f genügend Abstand von f_0 zu bekommen, das einem Fehler von 4,2 % entspricht.

$S = 4 \text{ mm}$ die Steigung der Spindel

daraus folgt:

$$f_0 > 23 \text{ Hz}$$

Die Eigenfrequenz der Stange sollte über 23 Hz liegen.

12. Schwingungsmessung an der Y-Achse

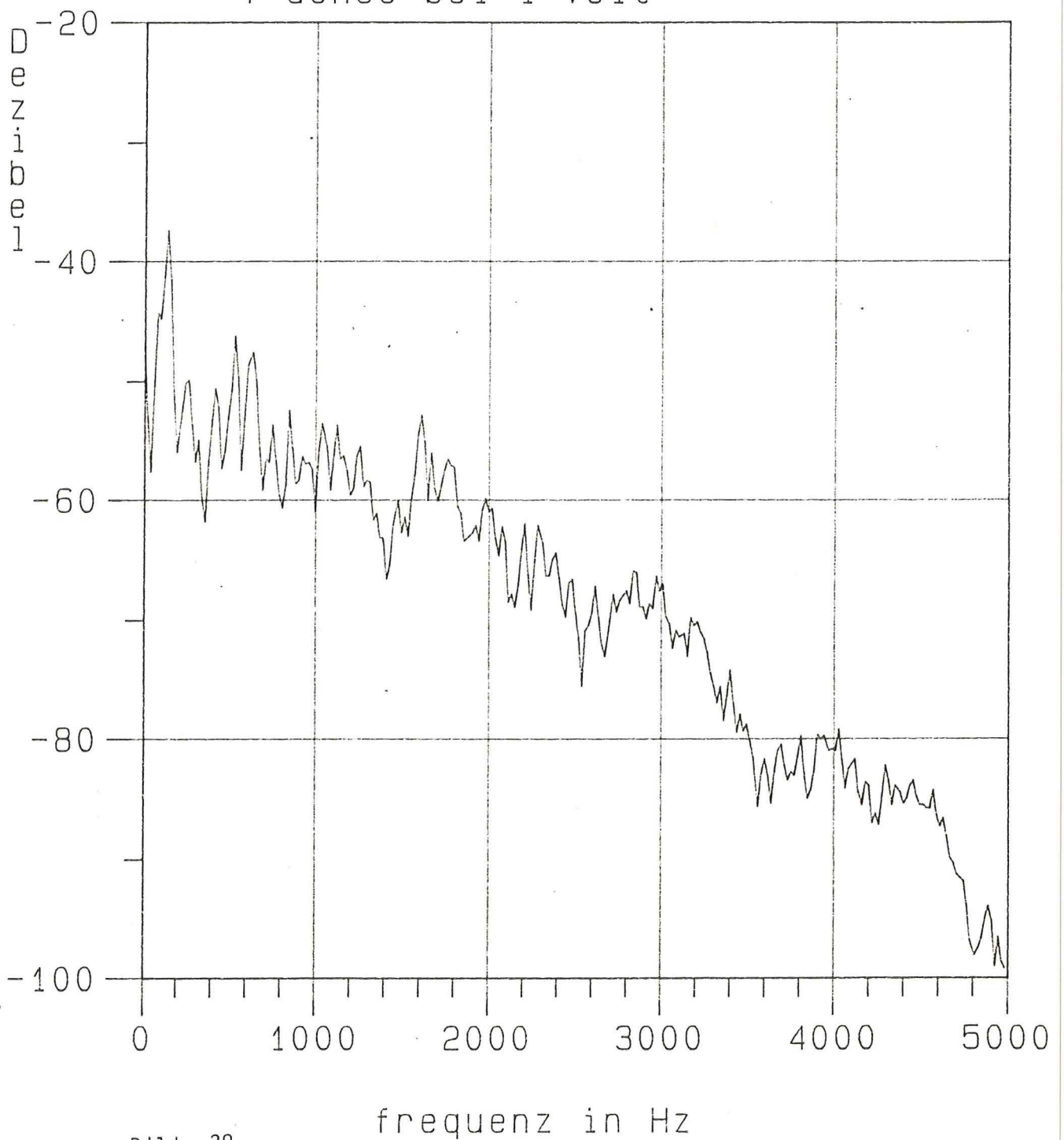
12.1 Aufnehmerempfindlichkeit in Z-Richtung

Die Messungen wurden an der Y-Achse vorgenommen, mit der Aufnehmerempfindlichkeit in Z-Richtung und die X-Achse auf dem Referenzpunkt positioniert.

Die Geschwindigkeit des Schlittens ist wieder abhängig von der Ausgangsspannung des Positioniercontrollers.

Die maximale Spannung von 10 V wurde in 10 Schritte unterteilt.

Frequenzanalyse der
Y-achse bei 1 Volt



Frequenzanalyse der
Y-Achse bei 3 Volt

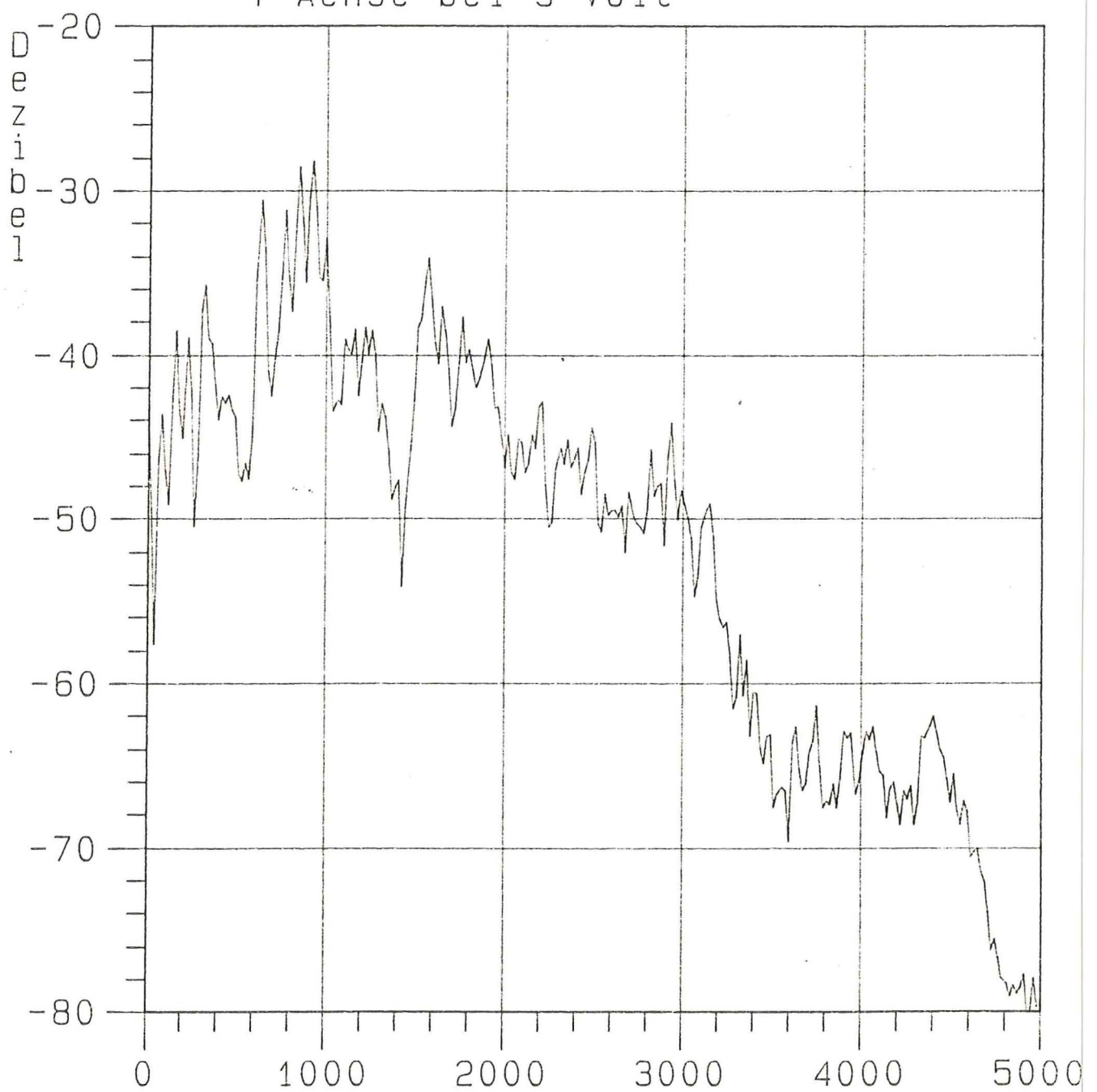


Bild 39

frequenz in Hz

Es fällt auf, daß die Spitzen der einzelnen Frequenzamplituden stärker ausgeprägt und in ihrer Intensität größer sind, als die Spektren der X-Achse. Die Ursache dafür ist, daß die Y-Achse auf den X-Schlitten gebaut ist. Während die X-Achse direkt auf dem Granitblock geschraubt ist, liegt bei der Y-Achse noch viel "Mechanik" dazwischen, was das System schwingfähiger macht. Dazu kommt noch, daß die Y-Achse teilweise freischwebt, weil die X-Achse nicht so breit ist.

Schon bei der Geschwindigkeit, die sich bei 6 V Ausgangsspannung (Bild 40) ergibt, sind leichte Resonanzüberhöhungen zu beobachten, die sich in der Größenordnung der Erdbeschleunigung befinden und diese bei 10 V (Bild 41) - jedoch bei anderen Frequenzen - sogar noch überschreitet. Geschwindigkeiten sind unbedingt zu meiden.

$$a_{\max} = g \cdot 10^{\frac{18 + dB_{\text{res}}}{20}} \quad \text{m/s}^2$$

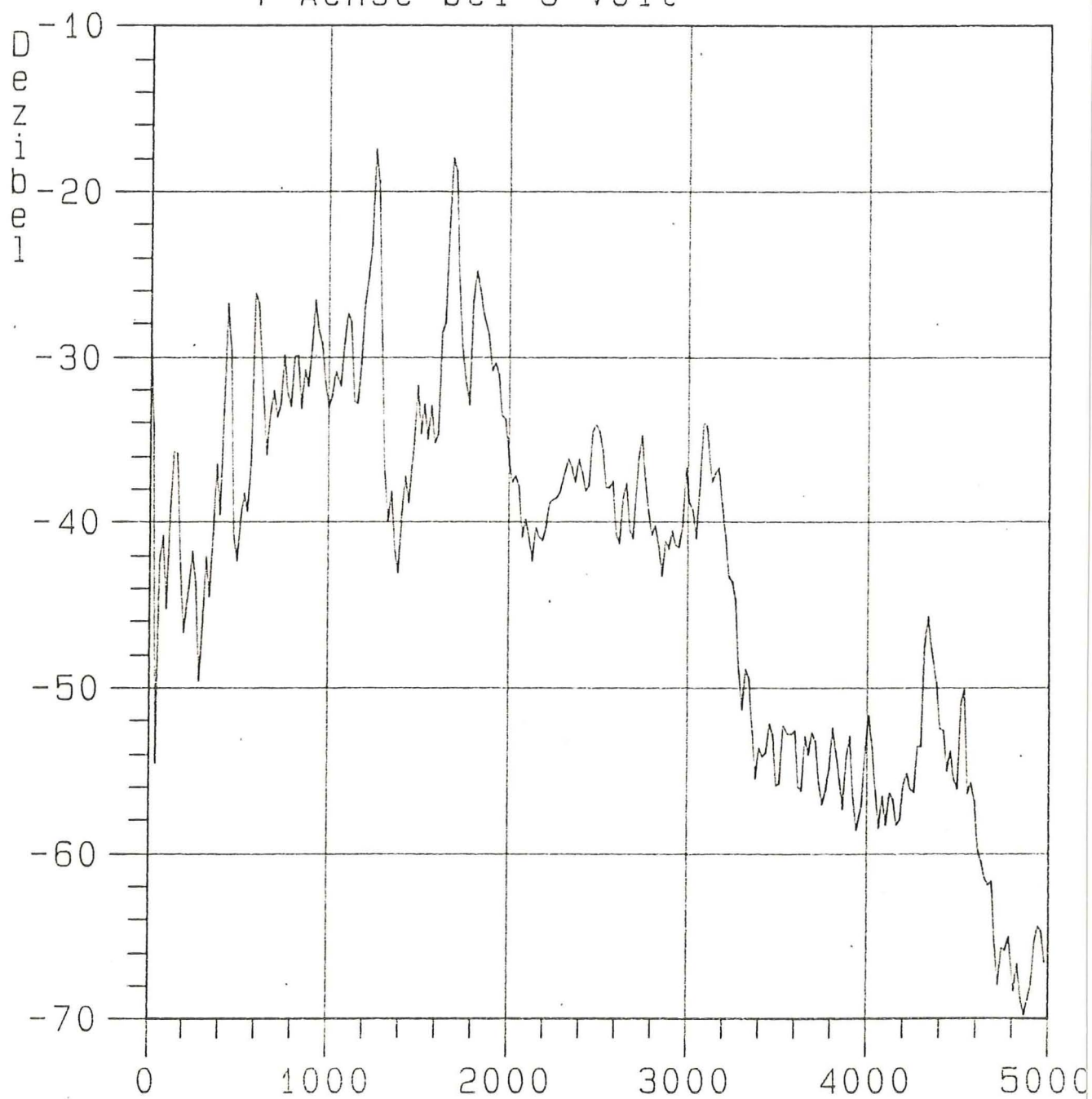
$$dB_{\text{res}} = -13$$

$$a_{\max} = 17,5 \text{ m/s}^2$$

Es wird empfohlen, die Geschwindigkeit der Y-Achse nicht mit mehr als 1 V Ausgangsspannung zu fahren. Da der Pegel auf Bild 38 gering ist und mit der Y-Achse während der Fahrt keine Messungen gemacht werden, ist dies zu vertreten.

Frequenzanalyse der Y-Achse im direkten Vergleich mit 1 V und 10 V Ausgangsspannung.

Frequenzanalyse der
Y-Achse bei 6 Volt



Frequenzanalyse der
Y-Achse bei 10 Volt

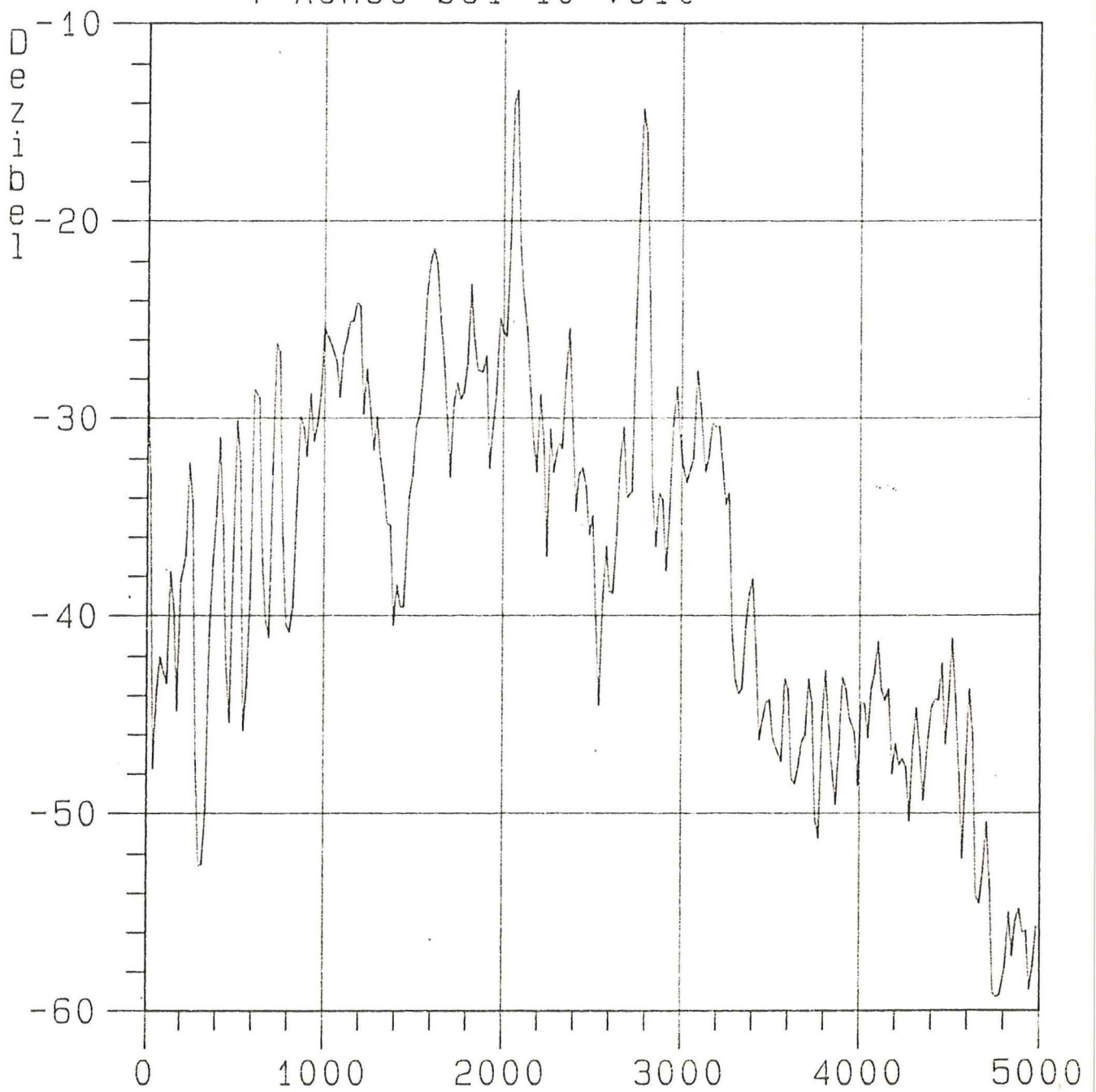


Bild 41

frequenz in Hz

Frequenzanalyse der Y-Achse
bei 1 Volt und 10 Volt

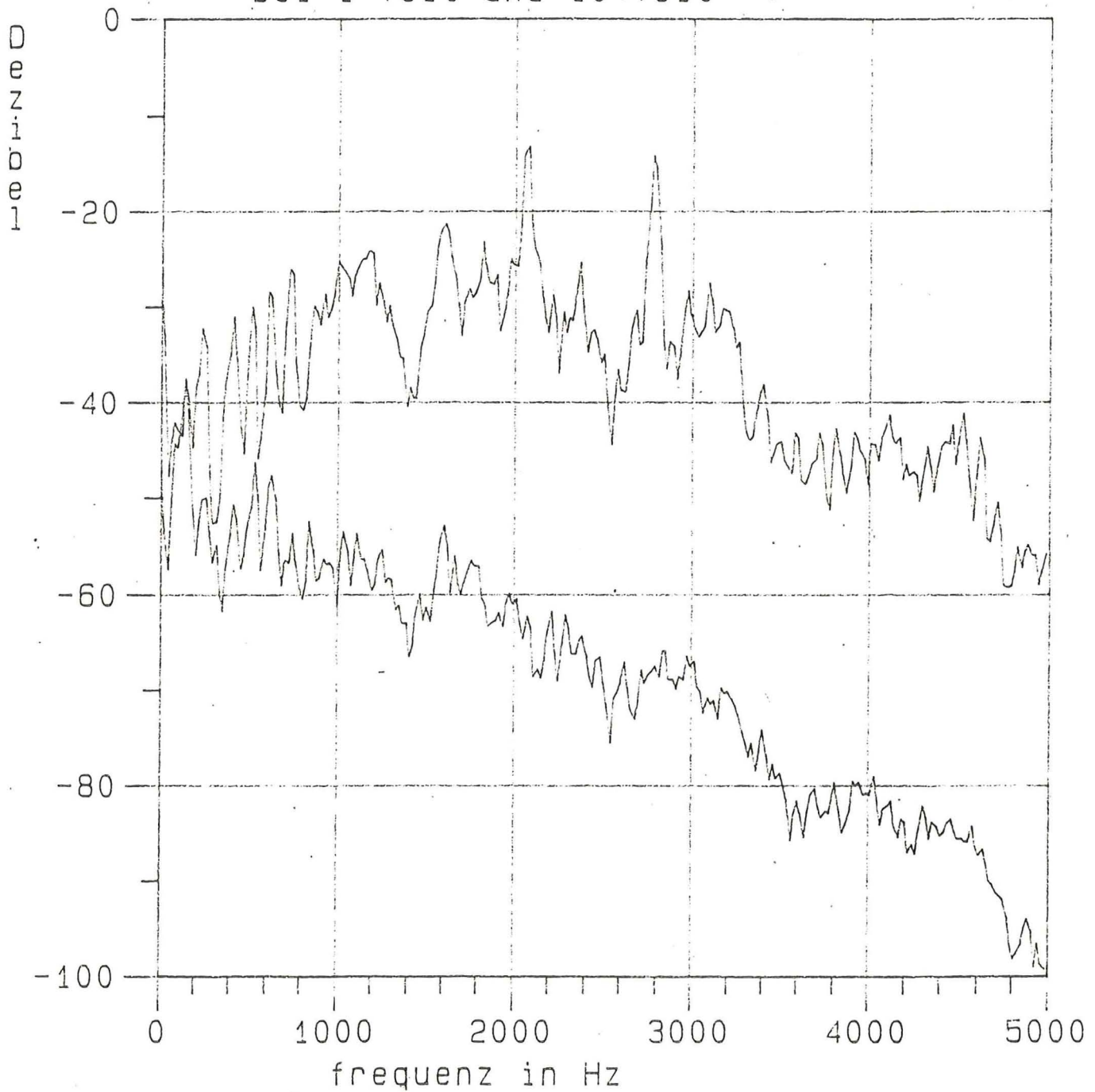


Bild 42

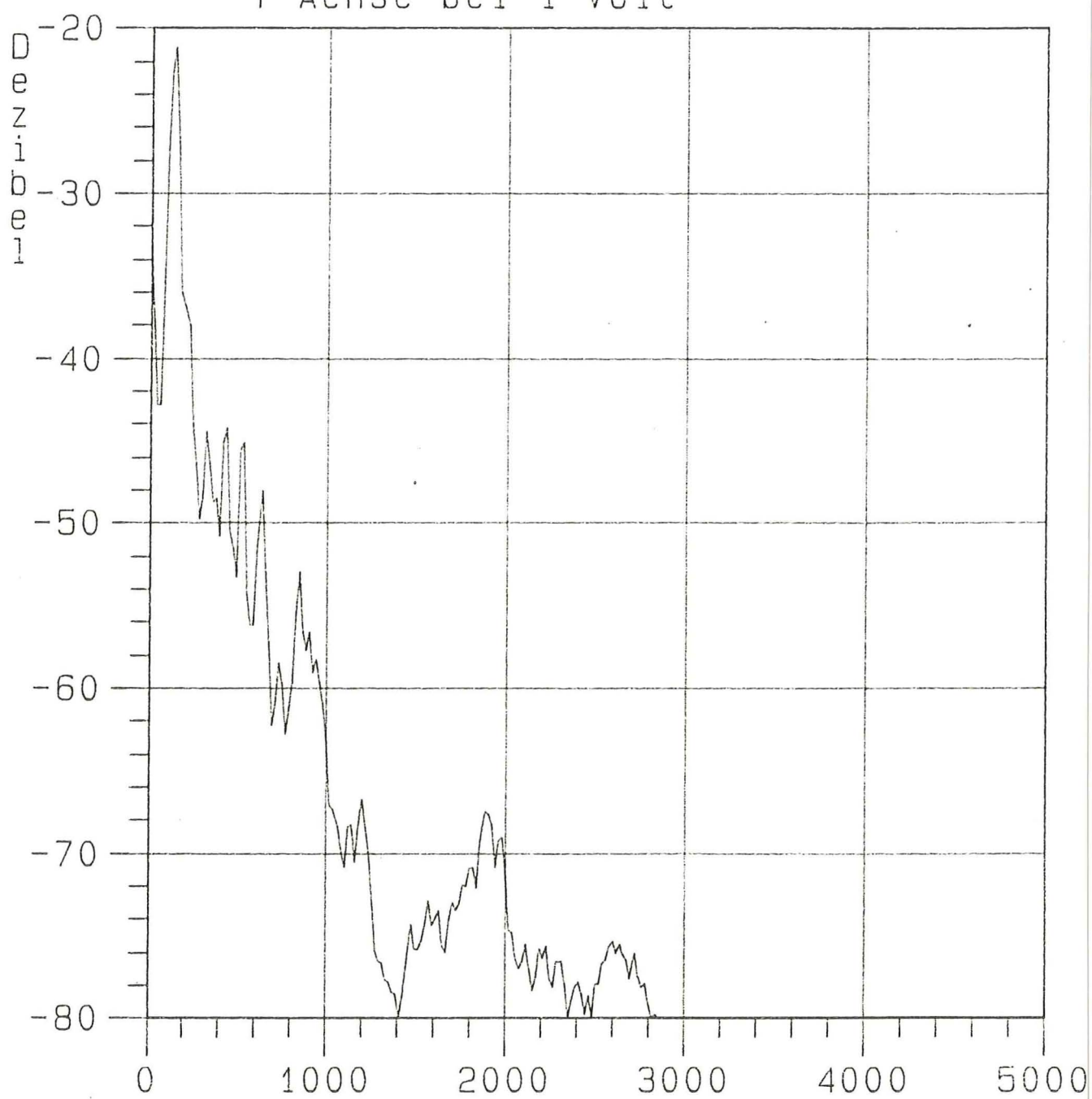
12.2 Schwingungsmessungen der Y-Achse mit der Aufnehmerempfindlichkeit in Y-Richtung

Die einzelnen Messungen wurden wieder genauso wie die anderen Schwingungsmessungen durchgeführt.

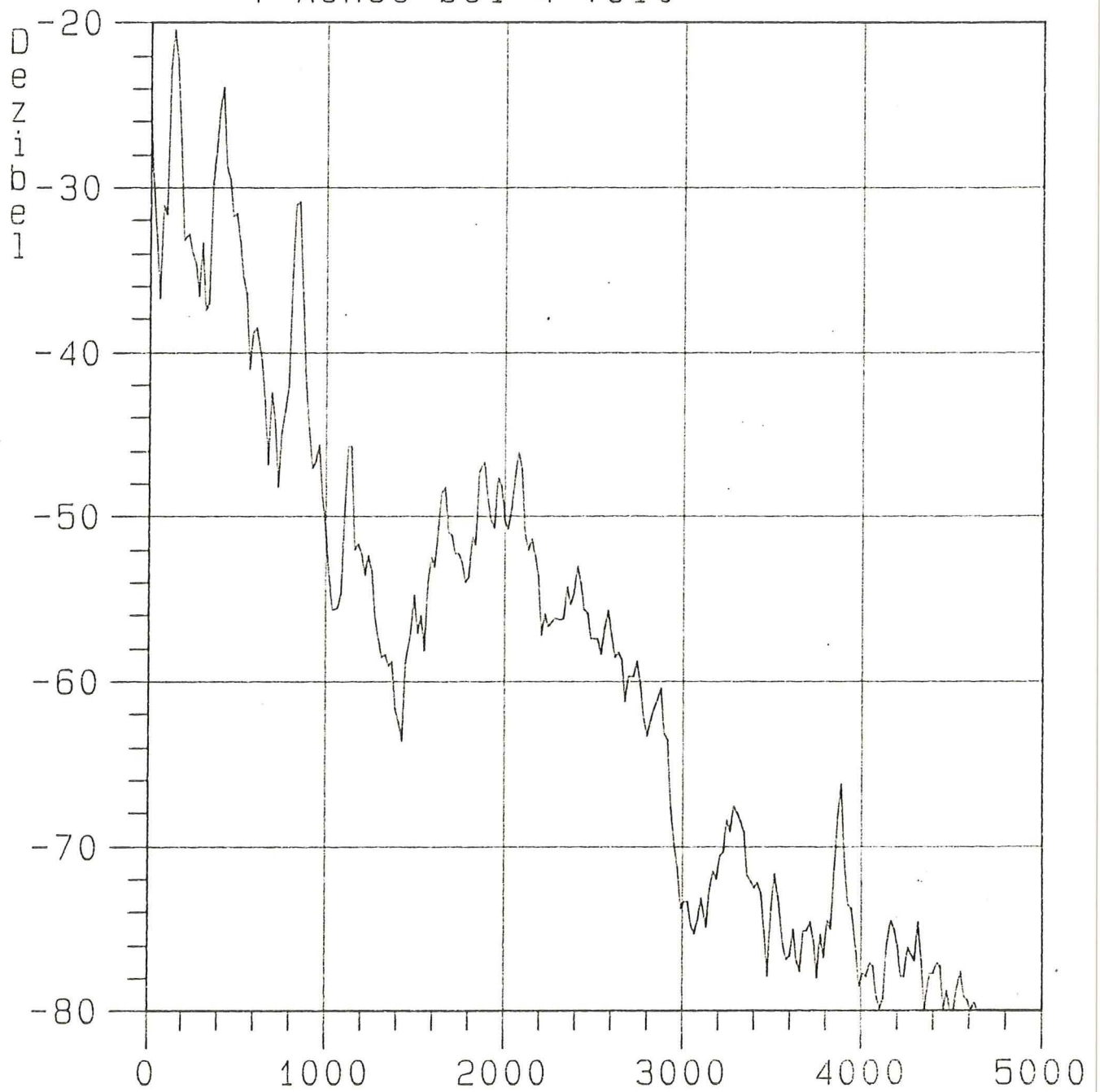
Bild 43 zeigt eine starke Resonanzamplitude bei ca. 200 Hz, deshalb wird die vorher gemachte Aussage, die Y-Achse bei 1 V zu fahren, aufgehoben, um die Empfehlung auf 0,6 V Ausgangsspannung zu drücken.

Mehr als 1 V ist nicht angebracht, weil die Amplitude bei 200 Hz dadurch nicht verschwindet, sondern sogar noch andere Amplituden bei anderen Frequenzen erscheinen (Bild 44).

Frequenzanalyse der
Y-Achse bei 1 Volt



Frequenzanalyse der
Y-Achse bei 4 Volt



13. Schwingungsmessungen an der Z-Achse

13.1. Aufnehmerempfindlichkeit in Z-Richtung

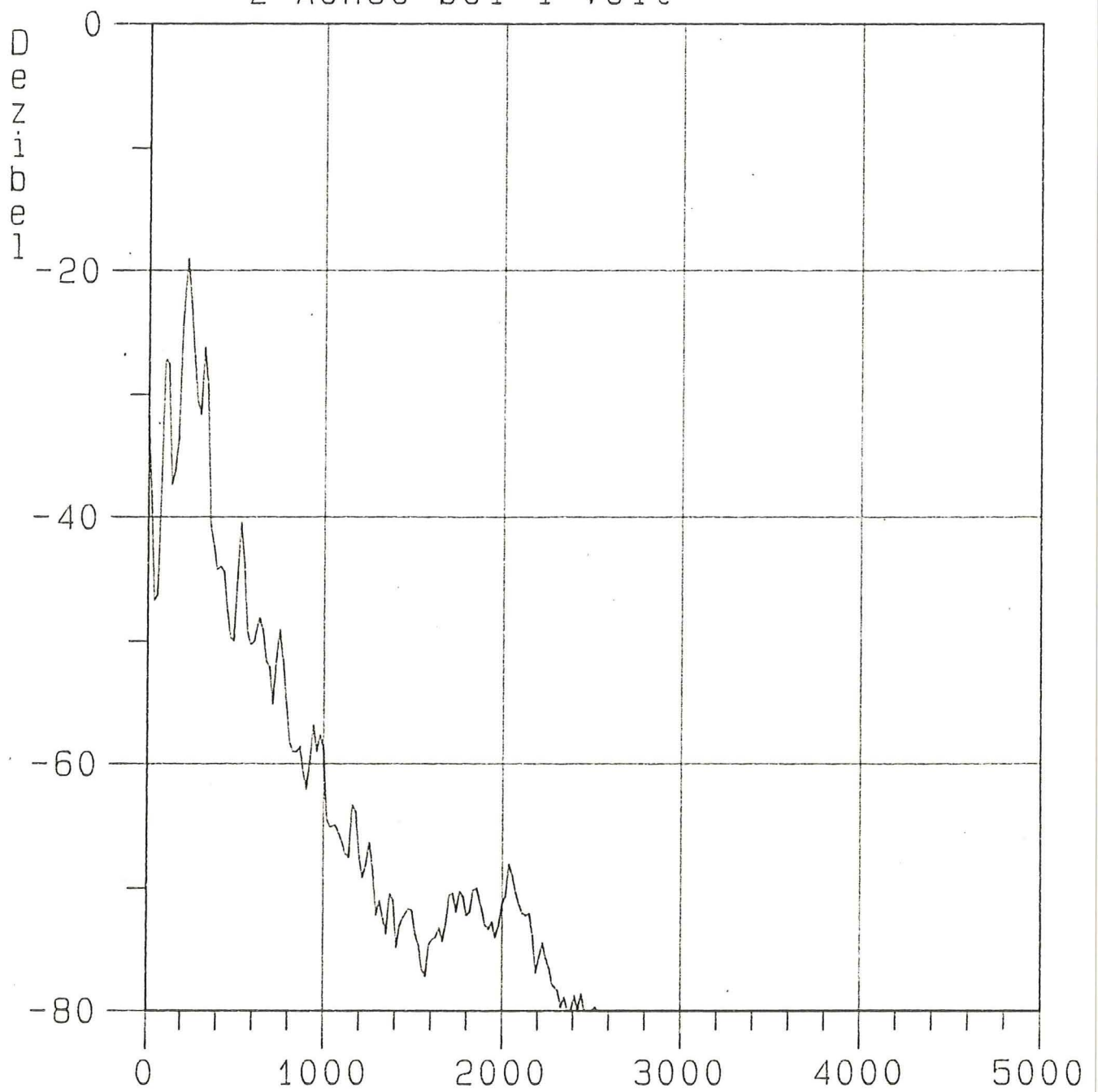
Die Messungen wurden wieder so wie die Schwingungsmessungen zuvor durchgeführt.

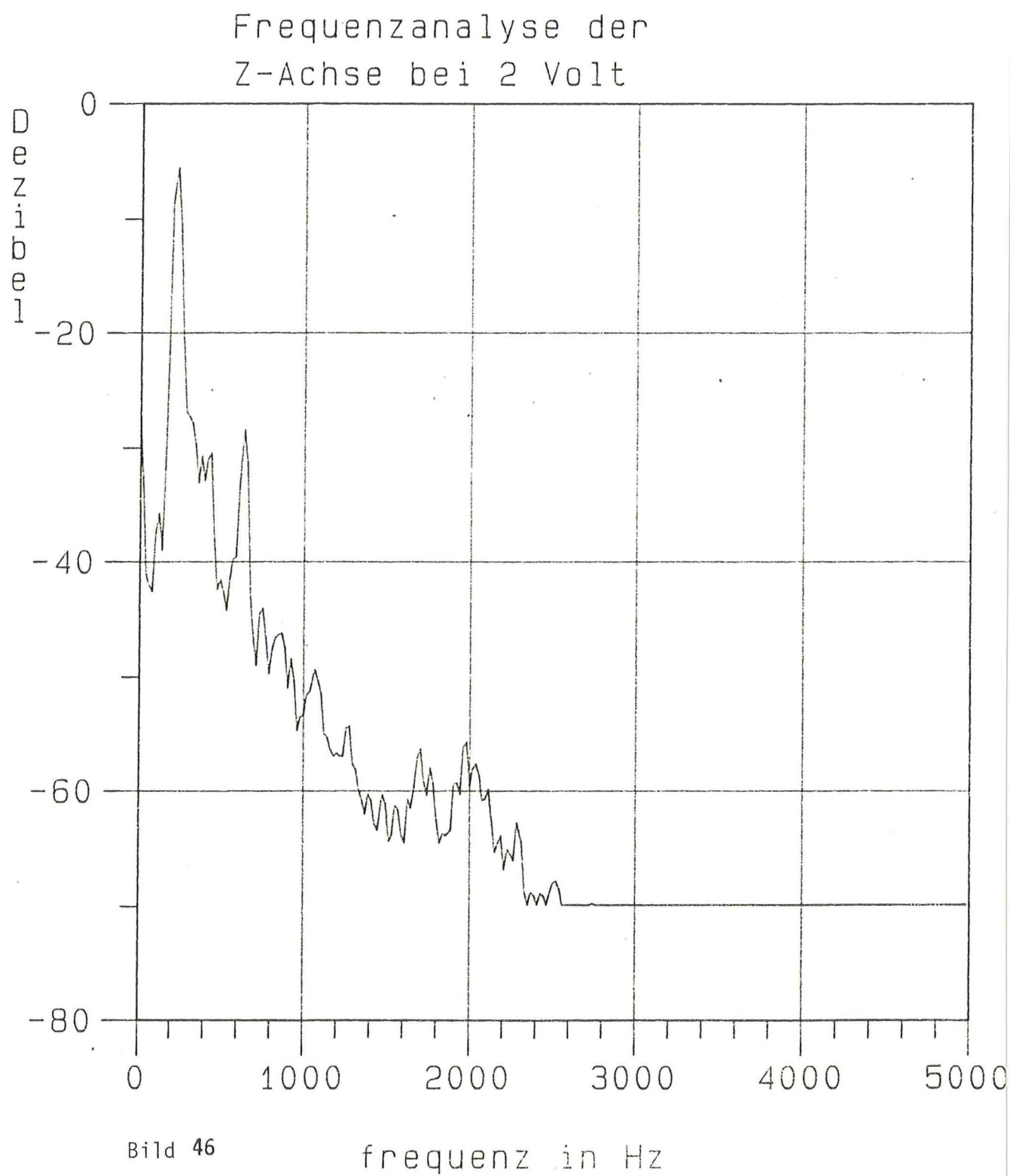
Schon bei 1 V zeigt die Amplitude einen hohen Wert. Das läßt sich wie bei der Y-Achse auch auf die Z-Achse übertragen, die auf die Y-Achse montiert ist.

Beim Vergleich von Bild 45 und Bild 46 erkennt man eine Zunahme der Amplitude, so daß die Spannung auch hier unter 1 V liegen sollte.

Empfohlen wird 0,6 V, so wie bei den anderen Achsen. Da mit der Z-Achse auch nicht während der Fahrt gemessen werden soll, kann auch mit 1 V gefahren werden, 2 V sollten aber vermieden werden.

Frequenzanalyse der Z-Achse bei 1 Volt





13.2. Schwingungsmessung an der Z-Achse mit der Aufnehmerempfindlichkeit in Y-Richtung

Im Gegensatz zu Bild 45 zeigt Bild 47 sehr kleine Amplituden bei 1 V Ausgangsspannung und stellt keine Gefahr dar, so daß die 0,6 V endgültig empfohlen werden können.

Frequenzanalyse der Z-Achse bei 1 Volt

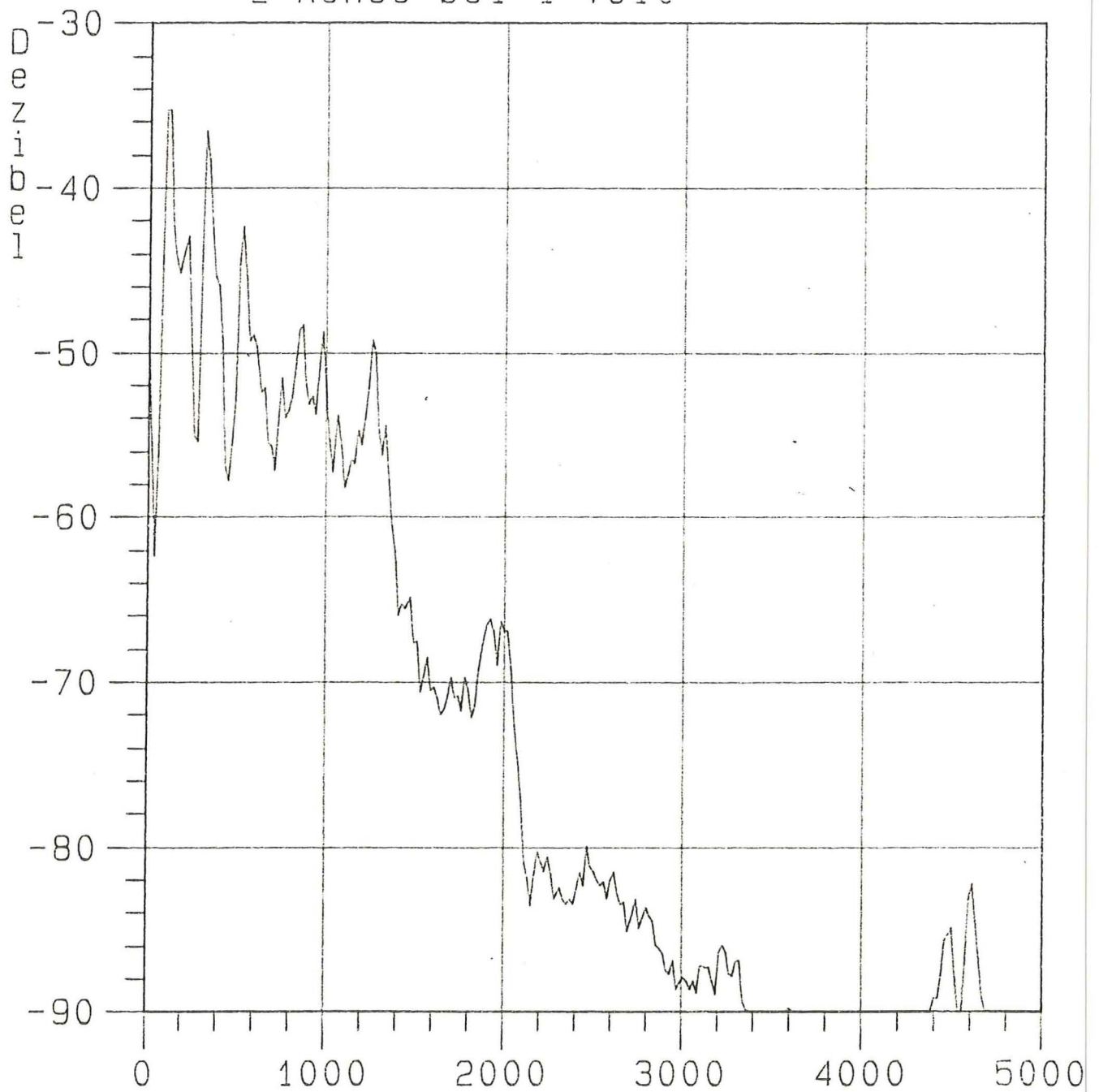


Bild 47

frequenz in Hz

14. Schwingverhalten des Granitblocks infolge Anfahren der
Achsen X und Y

Der Positioniercontroller schaltet seine Ausgangsspannung nicht sprunghaft durch, sondern es besteht die Möglichkeit, sie schneller oder langsamer auf den gewünschten Wert zu bringen. Dies ist nötig, um die Mechanik und den Motor nicht ständig mit den maximalen Beschleunigungen zu belasten.

$$a = \frac{v}{t} \quad \text{Beschleunigung}$$

Der Positioniercontroller ist programmierbar für die Anfahrtzeit von minimal 100 ms bis maximal $10 \cdot 10^3 \text{ ms} \hat{=} 10 \text{ s}$.

Die Anfahrtzeit bleibt unabhängig von der programmierten Ausgangsspannung, sie bleibt konstant.

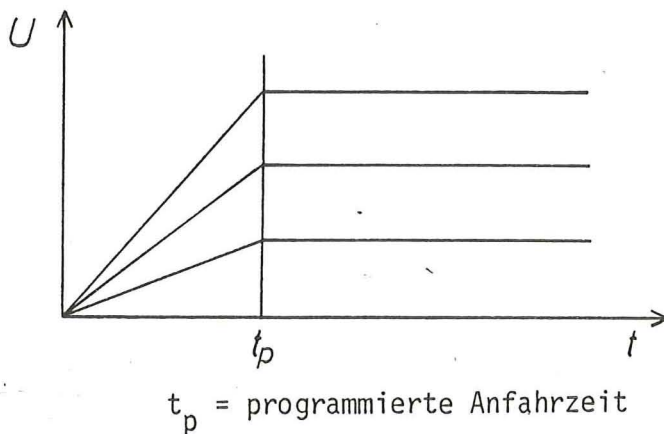
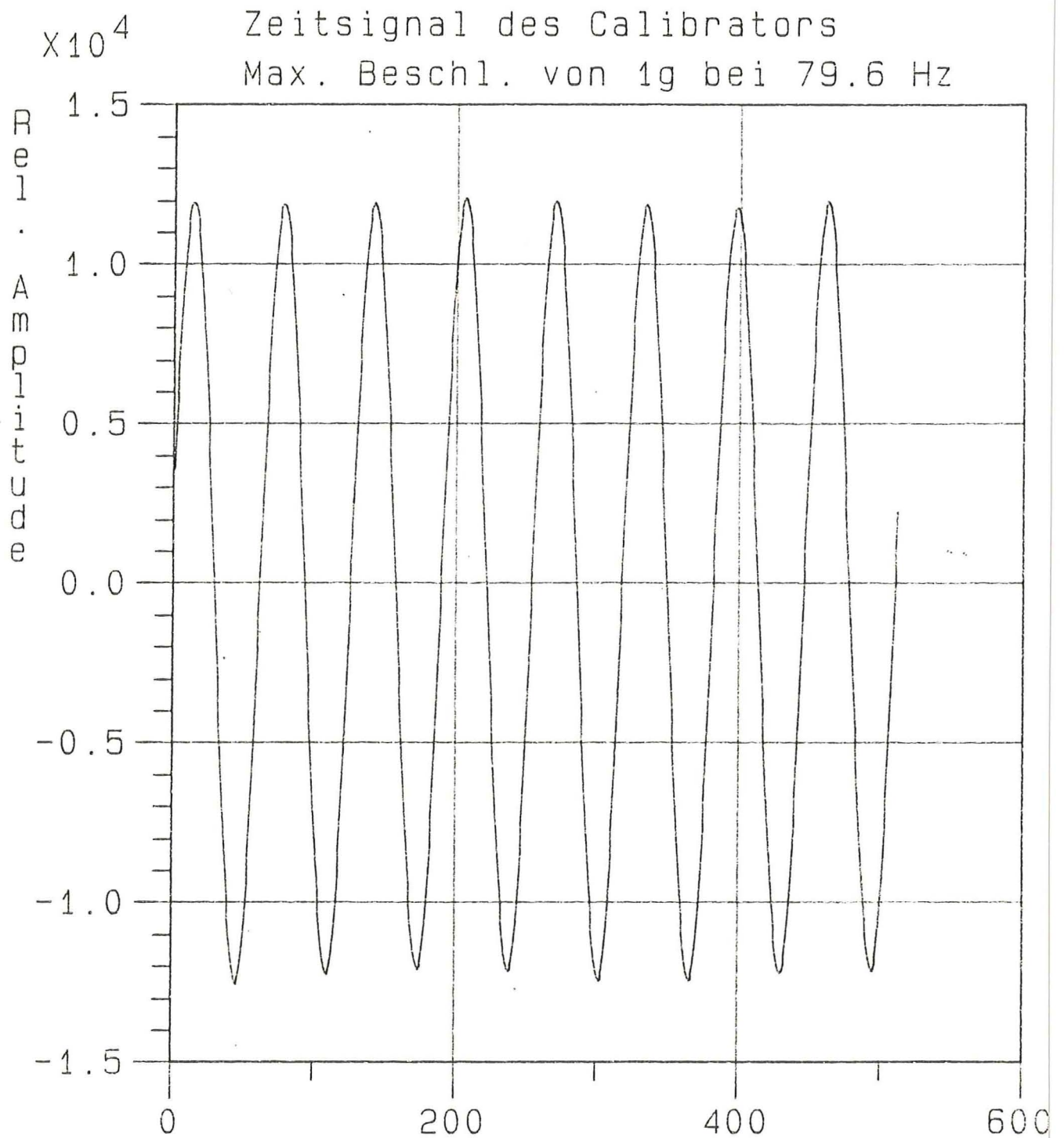


Bild 48 Anfahrrampe

Zeitsignal des Calibrators (Bild 49)

Die maximale Amplitude beträgt 1 g bei der Frequenz von 79,6 Hz.



Die Beschleunigung der Achsen, ist der Steigung $\frac{u}{t_p}$ proportional, nach Bild 10 und Bild 11 ist:

$$a_{xy} = \frac{U_{xy} - b_{xy}}{m_{xy} \cdot t_p}$$

und die Anfahrstrecke mit:

$$s_{xy} = \frac{(U_{xy} - b_{xy}) \cdot t_p}{2 \cdot m_{xy}} = \frac{a_{xy} \cdot t_p^2}{2}$$

Während der Anfahr- oder Abbremsprozedur sollen keine Feldmessungen durchgeführt werden. Sie gehören deshalb nicht zum Betriebszustand des Messvorgangs.

Auf den Granitblock wirkt eine Kraft, die aus der trägen Masse des Maschinenschlittens resultiert.

$$F = m \cdot a$$

Das Maschinengestell, das in X- und Y-Richtung schwingungsfähig ist, bekommt einen Kraftstoß jeweils durch eine der Achsen, wird dadurch aus der Ruhelage ausgelenkt und sich selbst überlassen, was zu Schwingungen führt.

Nun wurden die Anfahrzeiten in Abhängigkeit von der Endgeschwindigkeit der Achsen und der Ausgangsspannung des Positioniercontrollers optimiert. Die Schwingungen des Granitblocks während der Anfahrprozedur wurden gemessen und das Zeitsignal durch den Analysierer gespeichert und die Kurve auf dem Bildschirm aufgezeichnet.

Es wurde die Anfahrzeit als optimal bezeichnet, bei der der Granitblock die wenigsten Schwingungen durchführte oder die Anfahrzeit, bei der die Schwingungsamplitude des Blockes kleiner als die anders erregten Amplituden war. In Bild 50 ist die Amplitude des Kraftstoßes und das Abklingen der Amplitude auf die Restschwingung zu sehen. Beschreibung der Schwingung in Abschnitt 11.

14.1 Schwingungsmessung an dem Granitblock in X-Richtung

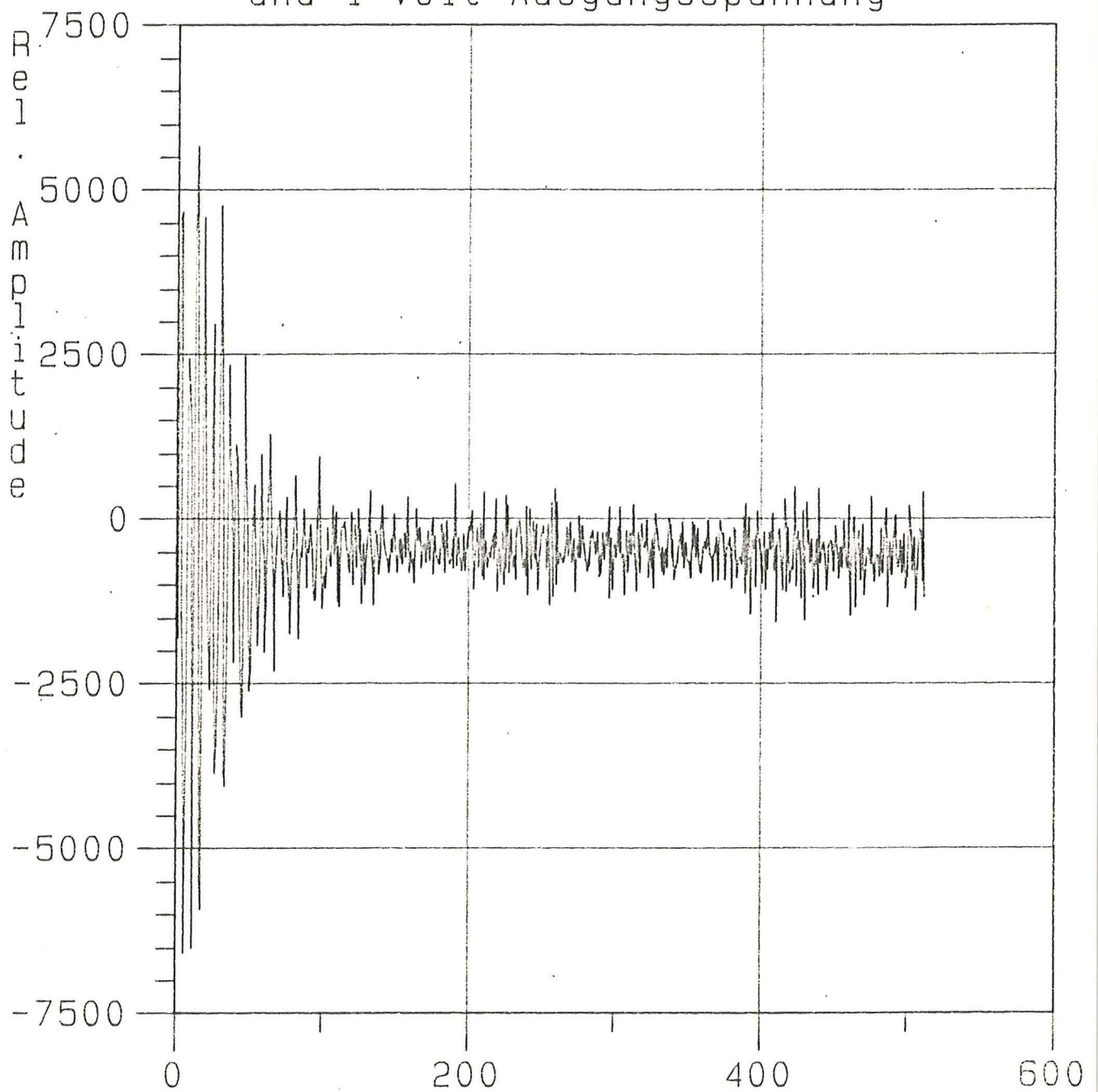
Bei der Schwingungsmeßung in X-Richtung wurde die X-Achse gefahren und der Beschleunigungsaufnehmer war an dem Granitblock befestigt mit der Aufnehmerempfindlichkeit in X-Richtung.

Die maximale Ausgangsspannung von 10 V des Positioniercontrollers wurde in 10 Schritte unterteilt.

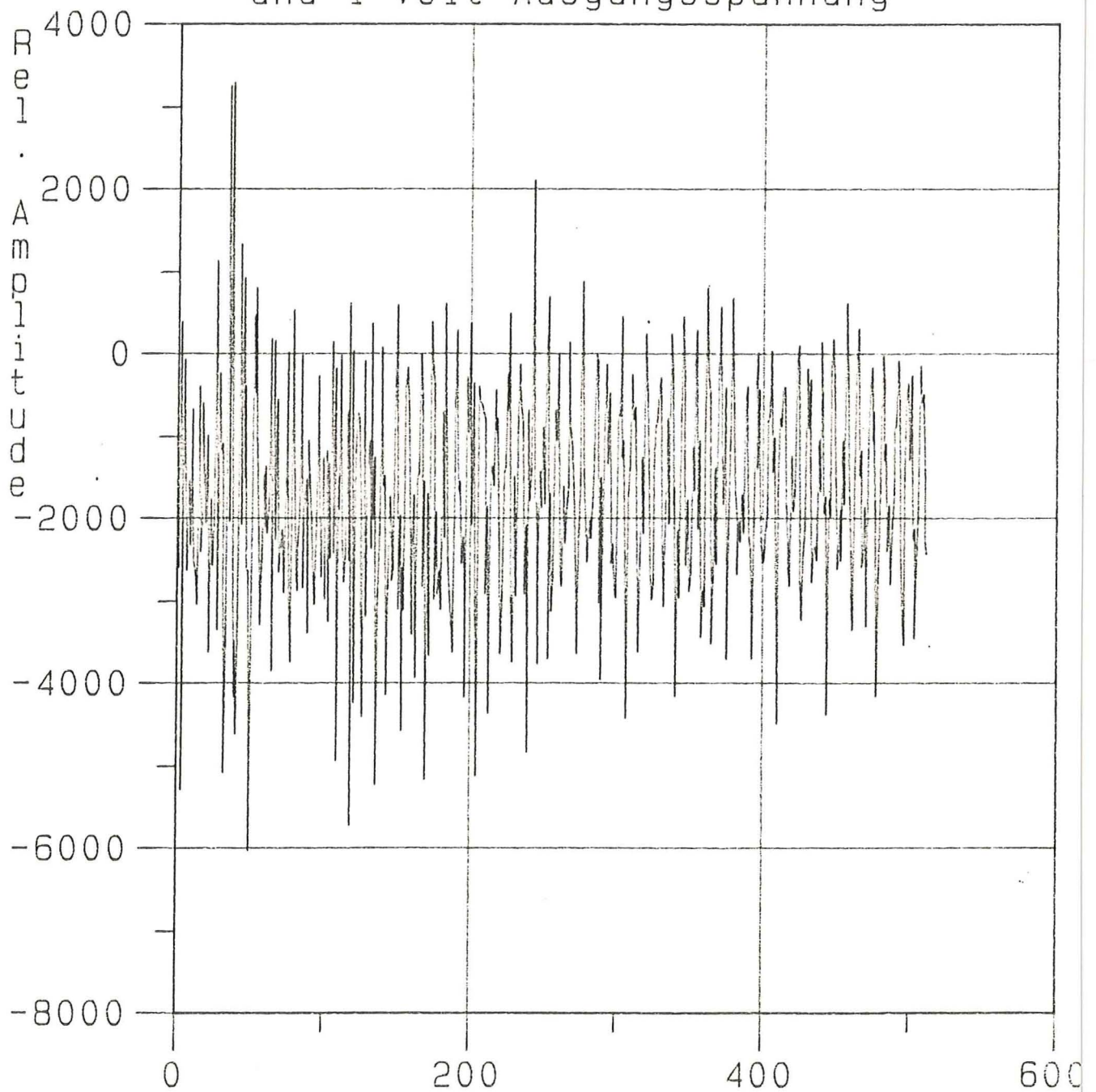
In Bild 50 läßt sich das Einschwingverhalten bei der Anfahrzeit erkennen, deren Impulsfolgeschwingungen weit über den normal erzeugten Schwingungen liegen. Mit Bild 51 ist die beste Anfahrzeit für 1 V Spannung gefunden.

Nach der Methode wurden (siehe Seite 91) auch die anderen optimalen Anfahrzeiten gefunden. Die empirisch gefundenen Werte sind in Tabelle 5 aufgezeichnet.

Zeitsignal bei 100 ms Anfahrzeit
und 1 Volt Ausgangsspannung



Zeitsignal bei 1000 ms Anfahrzeit
und 1 Volt Ausgangsspannung



Es ist zu erkennen, daß bei 6 V Ausgangsspannung ein Maximum der Anfahrzeit besteht. Oberhalb von 6 V fällt die Kurve wieder ab, weil die Schwingungen durch das Fahren schneller größer werden als die Schwingungen durch Anfahren, das heißt nicht, daß hier weniger Schwingungen vorhanden sind.

Bild 52 zeigt, wie der Tisch bei 7 V Ausgangsspannung und 5000 ms Anfahrzeit in Schwebung gerät.

Auch bei 9 V Ausgangsspannung und 3000 ms Anfahrzeit (Bild 53) gerät der Tisch in Schwebung, aber die Amplituden sind bei 4000 ms (Bild 54) wieder nahezu konstant.

Zeitsignal bei 5000 ms Anfahrzeit
und 7 Volt Ausgangsspannung

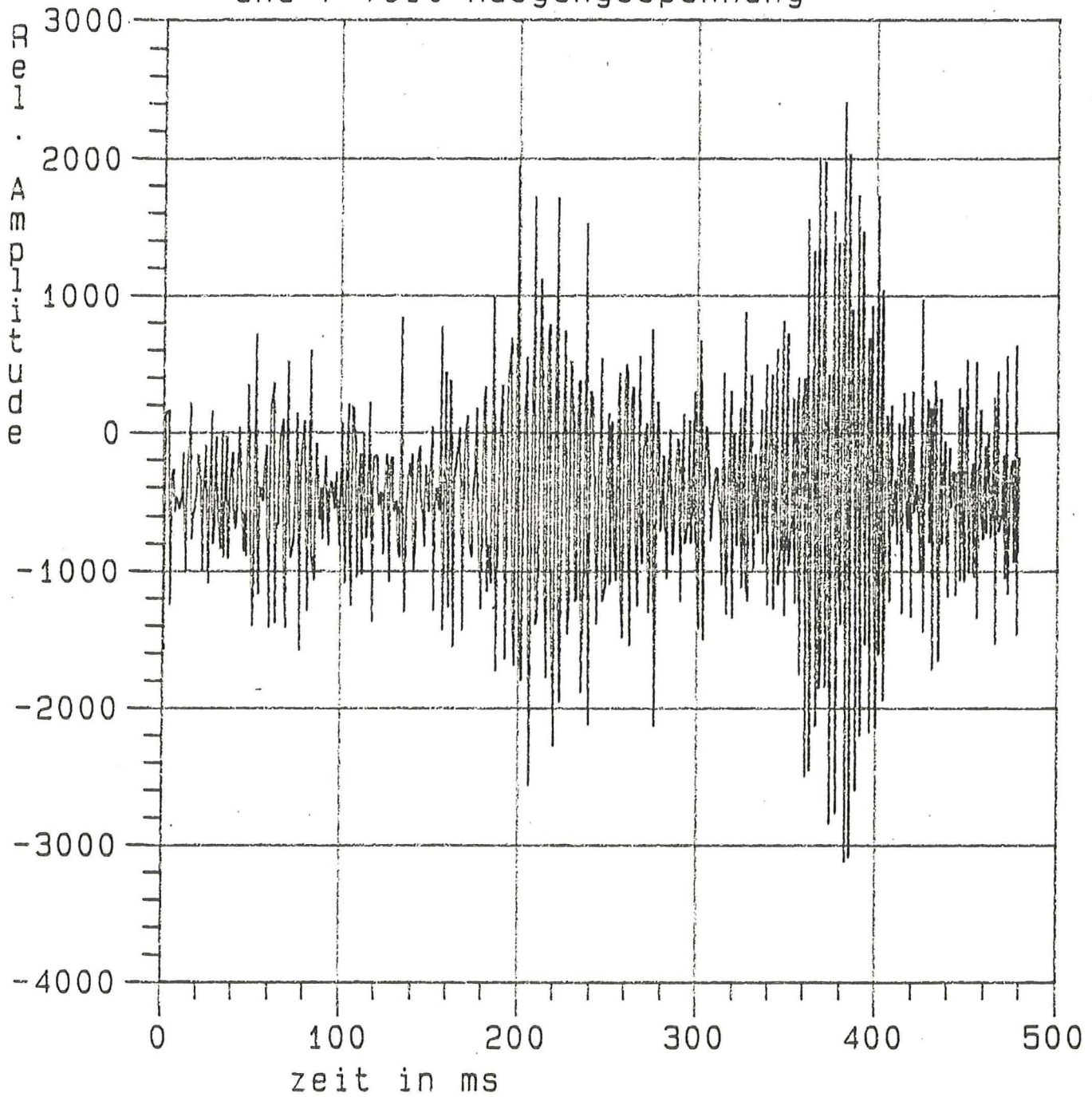


Bild 52

Tabelle 5 zeigt die optimalen Anfahrzeiten durch Kreuze gekennzeichnet in Abhängigkeit von der Ausgangsspannung

Ausgangsspannung in V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Anfahrzeit in ms										
100										
1000	X	X								
2000			X	X						
3000					X				X	X
4000								X		
5000										
6000							X			
7000										
8000						X				

Die Tabelle 5 wurde erweitert mit dem Anfahrverhalten unterhalb von 1 V Ausgangsspannung (Siehe Tabelle 5a).

Tabelle 5 a zeigt die Abhängigkeit der optimalen Anfahrzeit
von der Ausgangsspannung unter 1 V

Ausgangsspannung in V	0,4	0,6	0,8
Anfahrzeit in ms			
400			
600			
800	X		
1000		X	
1500			X

Zeitsignal bei 3000 ms Anfahrzeit
und 9 Volt Ausgangsspannung

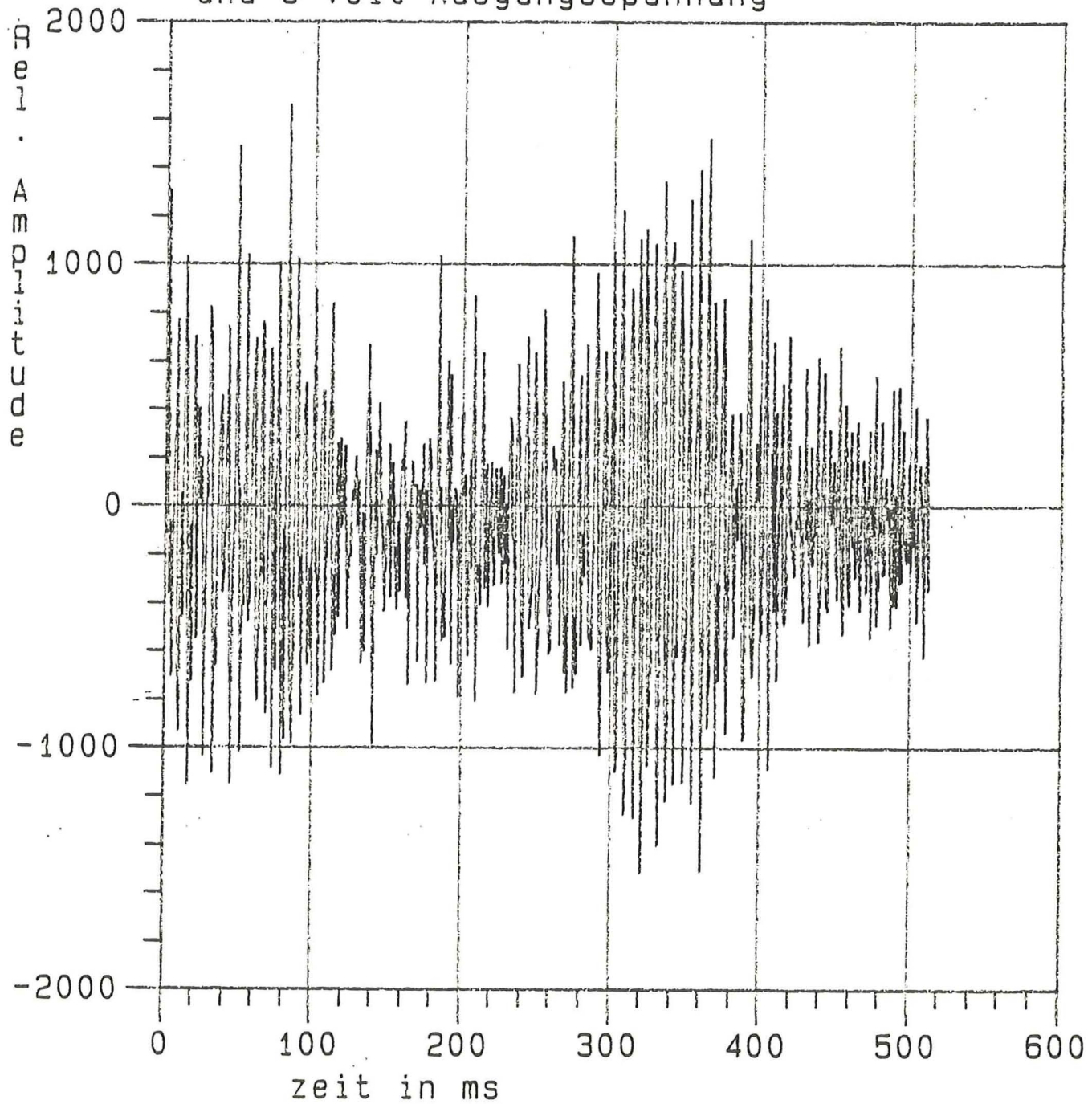


Bild 53

Zeitsignal bei 4000 ms Anfahrzeit
und 9 Volt Ausgangsspannung

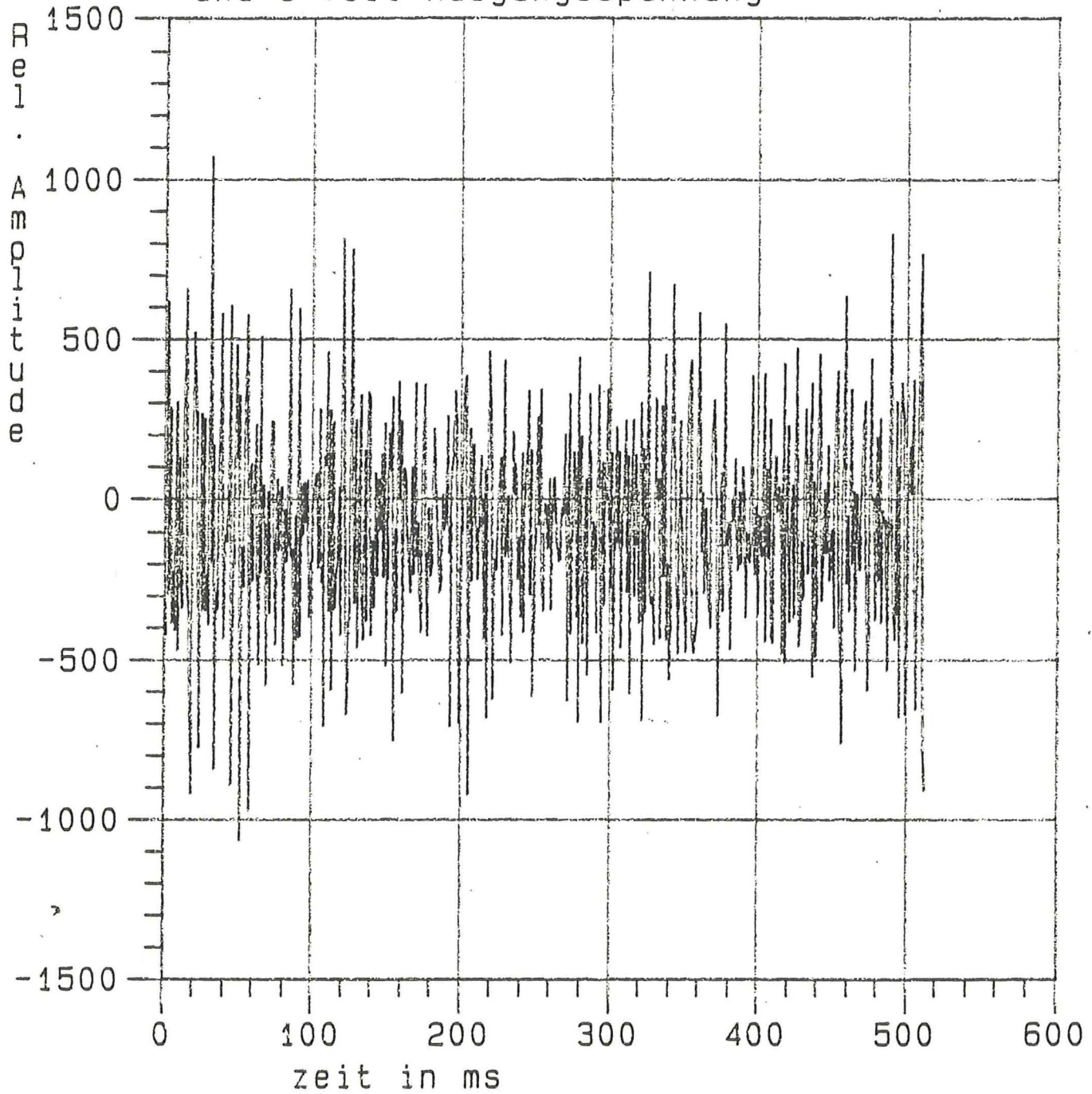


Tabelle 6 wurde erweitert mit dem Anfahrverhalten unter 1 V Ausgangsspannung.

Tabelle 6 a zeigt die optimale Anfahrzeit in Abhängigkeit von Spannung unter 1 V

Ausgangsspannung

in V

Anfahrzeit

in ms

	0,4	0,6	0,8
400	X		
600		X	
800			
1000			
1500			
2000			X

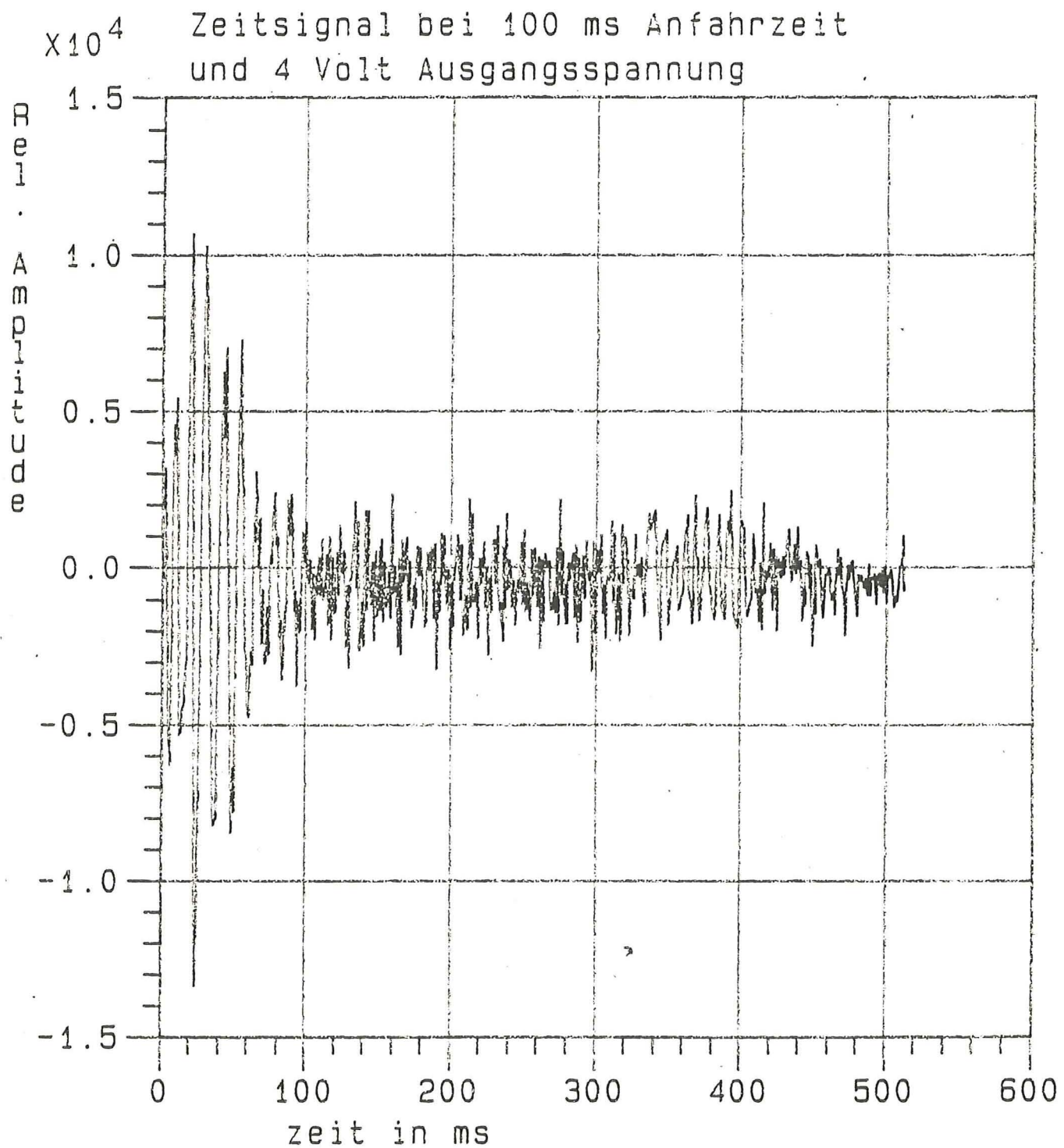


Bild 55

15. Schlußbemerkung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nur das dynamische Verhalten des Tisches behandelt, während die Vermessung der statischen Eigenschaften des Tisches in der Arbeit /11/ behandelt wurden.

Die optimalen Geschwindigkeiten der drei Achsen X, Y und Z wurden bei der Diskussion in den Abschnitten 11, 12 und 13 durch das Schwingverhalten des Tisches deutlich. Die Achsen Y und Z sind bei 0,6 V Ausgangsspannung zwar schwingfähiger als die X Achse, deren Anforderungen bei der Feldmessung sind aber nicht so hoch wie die der X-Achse.

Die Ausgangsspannung von 0,6 V bedeutet für die Y-Achse eine Geschwindigkeit von $v_y = 1131 \text{ mm/min} \pm 3 \%$ (Tabelle 2 b) und für die Z-Achse $v_{zp} = 1081,5 \text{ mm/min} \pm 1,8 \%$, $v_{zn} = 1079,6 \text{ mm/min} \pm 1,7 \%$.

Mit der X-Achse werden während des Fahrens die Magnetfelder ausgemessen. Wesentliche Voraussetzung präziser Feldmessungen ist, daß nicht mit mehr als 0,6 V Ausgangsspannung des Positioniercontrollers gefahren wird, was einer Geschwindigkeit von $v_x = 1086,9 \text{ mm/min} \pm 1,3 \%$ entspricht (siehe Tabelle 1 a).

Nach Abschnitt 7 ergibt sich für die X-Achse aus Tabelle 4 die mittlere Geschwindigkeit bei 0,6 V, $\bar{v}_x = 1073 \text{ mm/min} \pm 1 \text{ mm/min}$ und die relative Standardabweichung der Geschwindigkeitsschwankung

von: $\delta_r = \pm 0,093 \%$	$P = 68,3 \%$
$2 \delta_r = \pm 0,186 \%$	$P = 95,4 \%$

Das optimale Anfahrverhalten der drei Achsen mit deren Ausgangsspannung von 0,6 V ergeben eine Anfahrzeit

in X-Richtung von:

$$t_a = 1000 \text{ ms} = 1 \text{ s}$$

in Y-Richtung von:

$$t_a = 600 \text{ ms} = 0,6 \text{ s}$$

In Z-Richtung, dessen Anfahrverhalten den Granitblock nicht zum Schwingen anregt, wird analog zur Y-Richtung ein

$$t_a = 600 \text{ ms} = 0,6 \text{ s}$$

gewählt, damit keine großen Beschleunigungskräfte auftreten können.

16. Literaturverzeichnis

- /1/ Positioniercontroller, Programmpaket
 Lenord + Bauer, Oberhausen 1983

- /2/ Bedienungshandbuch Positioniercontroller
 Gel 4400 Lenord+Bauer, Oberhausen 1984

- /3/ Einführung in die Beschleuniger-Physik und
 Technologie, Vortragsmanuskript, herausgegeben
 von J. Schelten, KFA Jülich 1983, SNQ 2 M/CY 01 09 83

- /4/ F. Holzweißig H. Dresing, Maschinendynamik
 Springer, 1982, ISBN 3-211-81712-3, 2 Aufl.

- /5/ Taschenbuch für den Maschinenbau/Dubbel
 W. Beitz, K.H. Küttner, Springer 1981
 ISBN 3-540-09422-9, 14. Auflage

- /6/ Heinrich Rödel, Dynamik, 1971 Carl Hanser Verlag
 München, ISBN 3-446-10266-3, 7. Aufl.

- /7/ Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen
 anhand von Schwingungs- u. Geräuschemessung
 Vortragsskript, Brüel + Kjaer 1981
 Lehrgang Nr. 5281/42.004

- /8/ Hugo Neuert, Physik für Naturwissenschaftler III
 BI-Hochschultaschenbücher, Mannheim 1978, BD. 729
 ISBN 3-411-00729-x

- /9/ Christoph Rohrbach, Elektrisches Messen mechanischer Größen VDI - Verlag
- /10/ Kernforschungsanlage Jülich GmbH
SNQ Project Proposal
for a Spallation Neutron Source
SNQ-Report Jül-Spez-113/KfK 3175 1981
- /11/ W. Schiffer, Vermessung der statischen Eigenschaften eines dreiachsigen Koordinatenmeßtisches
Fachhochschule Aachen, Abt. Jülich 1985
- /12/ Laser Measurement System 5528A, User's Guide
Hawlett-Packard Company 1982
Manual Part Number o5528-90003

